

압전변압기를 이용한 소형·고효율 AC/DC 컨버터의 특성에 관한 연구

李政珉^{*}, 李 碩^{**}, 李正洛^{**}, 睦亨洙[†]

A Study on the Characteristics of Small Sized High Efficiency AC/DC Converter Using Piezoelectric Transformer

J.M. Lee, S. Lee, J.R. Lee, and H.S. Mok

요 약

일반적으로 압전변압기는 고압을 출력하는 전원장치로 사용되고 있으나, 최근 어댑터와 같은 AC/DC 전원장치에 이를 채용하려는 움직임이 활발히 전개되고 있다. AC/DC 컨버터의 소형·경량화를 위해 기존의 권선형 변압기 대신 압전변압기는 AC/DC 컨버터용이 아닌 LCD 백-라이트구동용으로 제작된 압전변압기(piezoelectric transformer)를 사용하여 AC/DC 컨버터의 기본 특성을 고찰하고자 한다. 압전변압기의 재질, 특성 값으로부터 등가회로의 모델링을 수행하고, 이를 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증한다.

ABSTRACT

Piezoelectric transformer(PZT) can be used advantageously in high output voltage power supply. Recently, it also can be used in AC/DC Converter for miniaturizing size and lightening weight. The modeling of PZT was performed by the calculation method through the physical and electrical constants of the material. The attributes of PZT were derived by an approximate analysis for output voltage gain, and resonant frequency. The proposed method is verified by computer simulation and experiment.

Key Words : Piezoelectric Transformer, AC/DC Converter

1. 서 론

최근 휴대형 전자·정보기기의 대중화가 가속화 되면서 장치의 소형·경량화에 대한 요구가 증가하고 있어, 이에 따른 전원장치의 소형화가 요구되고 있다. 이

러한 요구에 부응하기 위한 방법으로 부품의 소형화, 고효율화, 저노이즈화를 들 수 있는데 그 중 특히 휴대형 전자·정보기기용 전원장치의 소형화에 대한 요구가 증가되어 전력용반도체 소자의 스위칭 주파수를 최대한 높이는 동시에 변압기와 인덕터, 커패시터와 같은 수동소자의 크기를 줄이는 방향으로 연구가 집중되고 있다^[1]. 특히 이동통신기기, 휴대정보단말기(PDA) 및 디지털 비디오카메라(DVC), 노트북 컴퓨터(Notebook PC)와 같이 배터리를 사용하는 전자·정보기기의 충전장치는 AC 220V의 상용전원으로부터 5~12V의 DC 저전압을 출력해야 함으로 높은 전압변환

[†] 교신저자 : 정회원, 건국대 전기공학과 교수

E-mail : hsmok@konkuk.ac.kr

* 학생회원, 건국대 전기공학과 박사과정

** 학생회원, 건국대 전기공학과 졸업(석사)

접수일자 : 2003. 12. 30 1차 심사 : 2004. 1. 14

심사완료일 : 2004. 2. 11

비를 필요로 함으로 코일형 변압기의 채용이 일반화되어 있다. 코일형 변압기는 고 투자율의 코어에 권선을 감는 방식임으로 AC/DC 컨버터의 소형·경량화에 최대의 걸림돌로 작용하고 있어, 이의 해결을 위한 연구가 필요하다. 이러한 과제를 해결하는 방안의 하나로 압전변압기가 주목받고 있다^[2].

압전변압기는 전기적 에너지를 압전 역효과에 의해 기계적 에너지로 변환하고, 그 기계적 에너지를 압전 정효과에 의해 다시 전기적 에너지로 변환하는 소자로 일반적인 권선형 변압기와 비교할 때 구조가 간단하고, 소형이며, 박형으로 제작이 가능하고 높은 효율을 지니며, 누설자속에 의한 노이즈가 없다는 장점과 소형·경량화가 가능하다는 특징을 지니고 있다. 압전변압기는 C.A. Rosen에 의해 기본적인 형태의 압전변압기가 제안되어, 이론적, 실용적 연구가 시작된 후, NEC에서 적층형 압전변압기를 제안하는 등 최근까지 다양한 용도와 형태를 가진 압전변압기가 제안되어 LCD 백-라이트에서 권선형 변압기의 노이즈 영향을 보완하고 효율을 높이기 위해 압전변압기를 이용한 인버터에 대한 연구의 결과로 상품화가 이루어졌으며, 변압기를 사용하는 DC-DC 컨버터, AC/DC 전원장치로의 응용에 대한 연구가 진행되고 있다^[1].

본 논문에서는 AC/DC 컨버터의 소형·경량화를 위해 기존의 권선형 변압기 대신 LCD 백-라이트 구동용으로 제작된 압전변압기(piezoelectric transformer)를 사용하여 AC/DC 컨버터의 기본 특성을 고찰하였다. 참고로 LCD 백-라이트 구동용 압전변압기는 일반적으로 승압용으로 사용하지만 본 논문에서는 반대결선을 통하여 강압용으로 변경하였다. 우선 본 논문에서는 압전변압기의 기본적인 해석과 모델링을 수행하고 이를 바탕으로 AC/DC 컨버터를 구성 했을 때의 전반적인 특성을 시뮬레이션과 실험을 통하여 고찰하고자 한다. 사용한 압전변압기가 AC/DC 컨버터용으로 제작된 것이 아니어서 기본 특성이 어댑터나 다른 정보기기의 전원장치로의 응용은 어렵지만, 차후 AC/DC 컨버터용으로 제작한 압전변압기를 사용할 경우 그 전원장치의 기본적인 특성해석과 시뮬레이션등의 결과로 유용하게 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 압전변압기를 이용한 AC/DC 컨버터^[1]

그림1의 압전변압기를 AC/DC 컨버터에 적용했을 때의 각 특성을 살펴보기 위해 압전변압기와 브리지 다이오드 정류기, 부하의 등가회로를 압전변압기 1차측

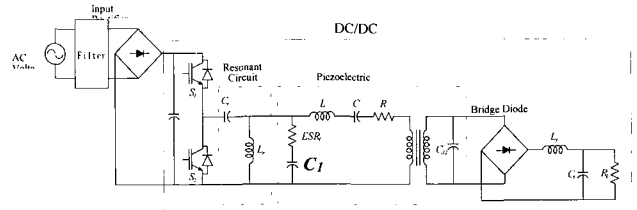


그림 1 압전변압기를 사용한 AC/DC 컨버터의 전체 회로도
Fig. 1 Overall Circuit Diagram of General AC/DC Converter Using PZT

으로 환산하면 그림 2(a)와 같이 표현할 수 있고, 2차측을 직렬형으로 변환하면 그림 2(b)와 같다. 이 때 부하측 필터는 없다고 가정하며, 입력 커패시터 C1은 압전변압기의 전력전달에 영향을 주지 않기 때문에 해석시 고려하지 않았다.

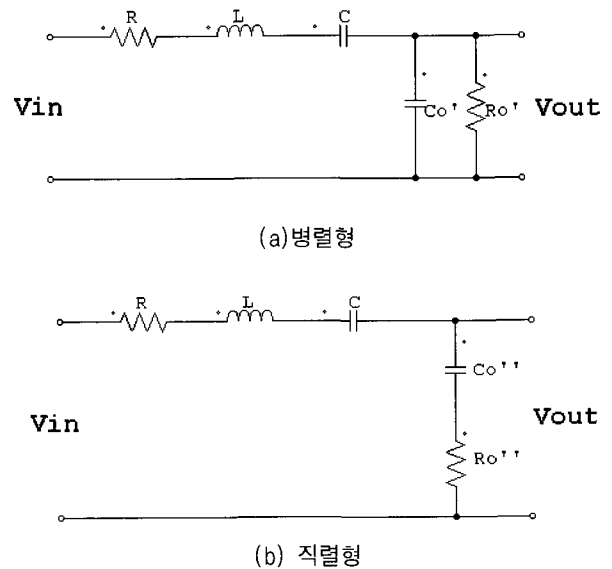


그림 2 1차측으로 환산한 압전변압기 등가회로
Fig. 2 Equivalent Circuit of Piezoelectric Transformer

$$R_o' = \frac{R_o}{n^2} \tag{1}$$

$$C_o' = n^2 \cdot C_o \tag{2}$$

$$V_{out}' = \frac{V_{out}}{n} \tag{3}$$

$$R_o'' = \frac{R_o'}{1 + (\omega \cdot C_o' \cdot R_o')^2} \tag{4}$$

$$C_o'' = C_o' \cdot \frac{1 + (\omega \cdot C_o' \cdot R_o')^2}{(\omega \cdot C_o' \cdot R_o')^2} \quad (5)$$

여기에서 ω : 운전주파수를 의미한다.

그림2의 등가회로에서 출력전압이 최대가 되는 공진 주파수 ω_r 을 구하면 (6)식과 같다.

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_e}} \quad (6)$$

여기에서 $C_e = \frac{C \cdot C_o''}{C + C_o''}$ 이다.

한편 직렬 공진주파수는 부하저항 R_o' 에 따라 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\omega_{rs} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (R_o' = 0 \text{인 경우}) \quad (7)$$

$$\omega_{ro} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot \frac{C \cdot C_o'}{C + C_o'}}} \quad (R_o' = \infty \text{인 경우}) \quad (8)$$

이 때 각 주파수와의 $\omega_{rs} < \omega_r < \omega_{ro}$ 관계를 갖는다.

그림 2의 등가회로를 이용하여 입력전압에 대한 출력전압의 비는 식(9)~(14)로 표현할 수 있다.

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{\sqrt{Y}} \quad (9)$$

여기에서 $Y = Y_1 + Y_2$

$$Y_1 = [1 - C \cdot ((\frac{\omega}{\omega_{rs}})^2 - 1) + \frac{R_o'}{R_o}]^2 \quad (10)$$

$$Y_2 = [\frac{\omega_{rs}}{\omega} \cdot \frac{C}{Q} \cdot ((\frac{\omega}{\omega_{rs}})^2 - 1) + \frac{\omega}{\omega_{rs}} \cdot \frac{C}{Q_m}]^2 \quad (11)$$

$$c = \frac{C_o'}{C} \quad (12)$$

$$Q = \omega_{rs} \cdot C_o' \cdot R_o \quad (13)$$

$$Q_m = \frac{1}{\omega_{rs}} \cdot C \cdot R \quad (14)$$

이때 입·출력전압비의 최대값(G_{max})은 식(15)와 같으며, 그 값은 부하와 운전주파수(ω_m)의 함수로 주어짐을 알 수 있고, 이의 해석을 통하여 운전조건을 선정한다.

$$G_{max} = \frac{1}{\cos \phi_m + \frac{c}{Q_m \cdot Q \cdot \cos \phi_m}} \quad (15)$$

여기에서 $\phi_m = \tan^{-1}(\omega_m \cdot C_o' \cdot R_o')$ 로 표현된다.

입력전압에 따른 출력전력과 효율의 관계를 식(16)과 (17)로 나타내었다.

$$P_o = \frac{(G_{max} \cdot V_{in})^2}{R_o'} \quad (16)$$

$$\eta = \frac{R_o''}{R_o'' + R} = \frac{1}{1 + \frac{c}{Q_m [\frac{1}{Q} + \frac{\omega}{\omega_{rs}}^2 \cdot Q]}} \quad (17)$$

3. 압전변압기의 모델링^[7]

그림 3은 본 논문에서 사용한 LCD 백-라이트용 압전변압기의 구조를 나타내고 있다. 압전변압기는 11개의 압전 세라믹판을 적층하여 구성된 2개의 압전 세라믹 적층판의 결합체로 구성되며, 그 기능에 따라 전달부(ultrasonic transmitter), 결합부(coupling piece), 수신부(receiver)로 나눌 수 있다. 압전변압기의 동작에 대해 간단히 살펴보면 전달부인 길이방향으로 분극된 입력판에 길이 방향의 공진주파수를 갖는 전압 V를 인가하면 길이방향으로 전계 $V/d[V/m]$ 에 비례하는 응력(stress) T_{33} 가 발생하여 길이방향으로 기계적인 진동이 발생한다. 이 응력(stress)은 결합부에 의해 수신부인 두께방향으로 분극된 길이방향 진동자로 전달되어 $V' = E' \cdot t [V]$ 의 전압을 발생하게 된다. 이러한 압전변압기의 물리적, 전기적인 사양은 표 1과 같고, 무부하시의 임피던스 측정 특성을 그림 4에 나타내었다. 무부하시의 공진주파수는 임피던스가 최소가 되는 지점으로 80[kHz]로 나타났으며, 부하에 따라 공진주파수는 다소 변동하는 특성을 지니고 있다.

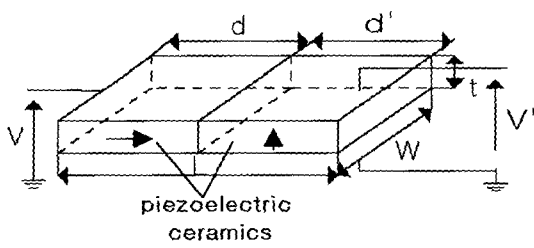


그림 3 압전변압기의 구조
Fig. 3 Structure of Piezoelectric transformer

이 압전변압기의 입·출력전압비를 나타내는 전압변환비 N은 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$N = \frac{V'}{V} \propto \frac{t}{d} \quad (18)$$

한편, 공진주파수에서의 응력과 전계 및 전압변환비는 Q factor에 의해 식(19)에 나타낸 것처럼 증가하는 특성을 지니며, 무부하시의 전압변환비 N은 식 (20)식에 의해 계산할 수 있다^[7].

$$N \propto Q \cdot \frac{t}{d} \quad (19)$$

$$N = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{d_{31} \cdot g_{33}}{s} \cdot \frac{t}{d} \cdot Q \quad (20)$$

본 논문에서 사용한 압전변압기의 물리적, 전기적 특성 및 상수값을 표 1에 나타내었고, 무부하상태에서 측정된 임피던스는 그림 4와 같다. 80[kHz]에서 임피던스의 값이 최소를 보임으로 그때의 주파수가 바로 무부하 공진주파수임을 알 수 있다.

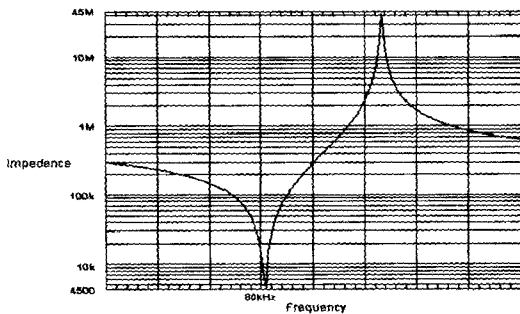


그림 4 압전변압기의 임피던스 특성곡선
Fig. 4 Impedance characteristics of PZT

표 1 압전변압기의 사양

Table 1 Specifications of piezoelectric transformer

크기	35mm(L) x 5.93mm(W) x 1.70mm(t)	
입력측 적층수	11	
출력측 적층수	11	
변환효율	97[%]	
전압변환비	0.1877	
동작주파수	80[kHz]	
물리적 특성	Density ρ [kg/m ³]	7.78 × 10 ³
	Mechanical Quality Factor Q	770
전기적특성	전기기계결합계수 k_{31}	0.35
	전기기계결합계수 k_{33}	0.68
	Piezoelectric constant d_{31} [m/V]	134 × 10 ⁻¹²
	Piezoelectric constant d_{33} [m/V]	308 × 10 ⁻¹²
Elastic 상수	Piezoelectric constant g_{33} [m/V]	27.894 × 10 ⁻³
	S_{11}^E	13.34 × 10 ⁻¹²
	S_{33}^E	18.58 × 10 ⁻¹²

3.1 압전변압기의 파라미터 계산

공진주파수 부근에서 동작하는 압전변압기의 등가회로는 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 등가회로에 사용할 각 요소의 값들은 공진주파수 부근에서 어드미턴스 원선도에 의해서 측정하거나, 표 2의 수식에 의해 결정할 수 있다^[7]. 압전변압기의 사양으로부터 각 파라미터를 계산한 결과를 표 2에 나타내었다.

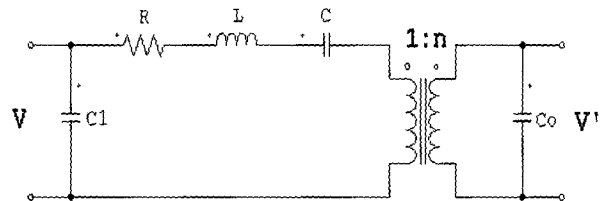


그림 5 압전변압기의 등가회로
Fig. 5 Equivalent Circuit of PZT

표 2 등가회로 파라미터
Table 2 Parameters of Equivalent Circuit

n	$N = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{d_{31} \cdot g_{33}}{s} \cdot \frac{t}{d} \cdot Q$	0.1877
C1	$C_1 = \frac{d_{31}^2}{k_{31} \cdot s_{11}} \cdot (1 - k_{31}^2)(W \cdot d/t)$	2.0[pF]
R	$R = L \cdot \omega_r / Q$	114.9[Ω]
L	$L = \frac{1}{C \cdot \omega_r^2}$	176[mH]
C	$C = 4 \cdot k_{33}^2 / \pi^2 \cdot C_o$	22.4[pF]
Co	$C_o = \frac{d_{31}^2}{k_{31} \cdot s_{11}} \cdot (1 - k_{33}^2)(W \cdot t/d)$	120[pF]

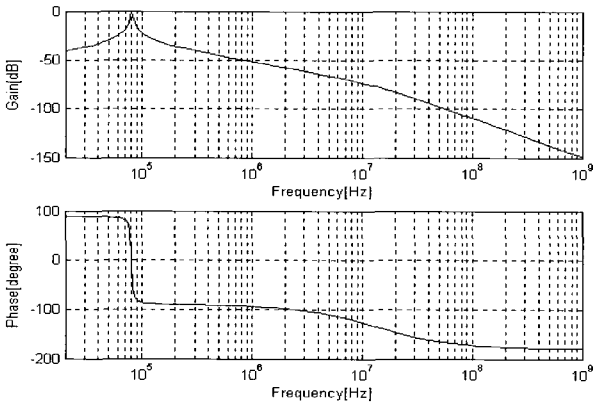


그림 6 등가회로의 주파수 특성곡선
Fig. 6 Frequency Response of Equivalent Circuit

3.2 압전변압기의 특성 계산

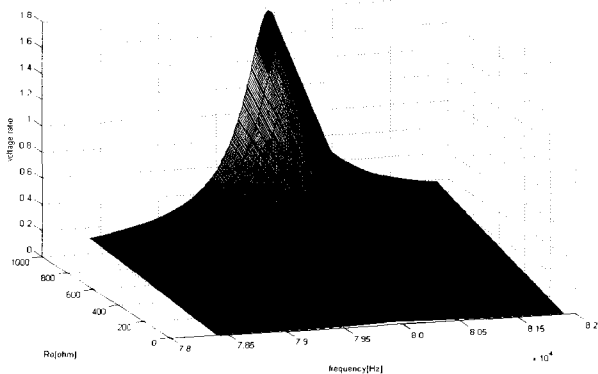


그림 7 주파수와 부하에 따른 입·출력전압비의 변화
Fig. 7 Variation of the ration of output to input voltage as frequency and load

추출한 파라미터의 타당성을 검증하기 위하여 그림5의 등가회로에 대한 주파수 응답특성 곡선을 시뮬레이션 한 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 4와 비교할 때 무부하 공진점이 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 7에서는 주파수를 78[kHz]에서 82[kHz]로 변화하면서 0~1000[Ω]까지 부하를 변화시켰을 때의 입·출력전압비의 변화를 나타내었다. 운전주파수에 따라 입·출력전압비가 급변하는 특성을 지니기 때문에 운전주파수를 공진주파수 근처로 선정해야하고, 공진주파수를 중심으로 약간씩 운전주파수를 변동하여 부하 변화에 따라 전압제어를 수행 할 수 있음을 알 수 있다. 그림 1에서처럼 압전변압기에 인가되는 전압은 교류전압을 다이오드 정류기를 통해 정류한 다음, Half-Bridge인버터를 이용하는 펄스형을 취하게 된다. 교류 입력전압을 정류한 직류전압이 인버터에 인가되며, 변조비=50%로 운전하게 된다.

4. 시뮬레이션

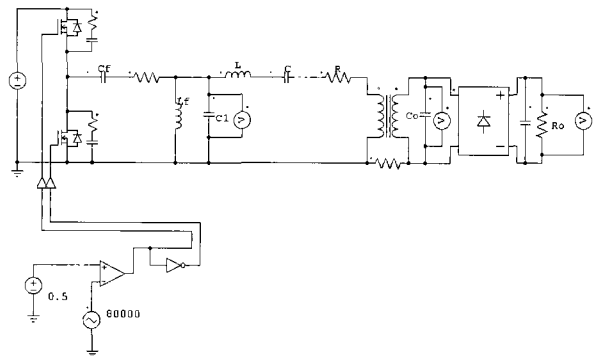


그림 8 압전변압기를 사용한 AC/DC 컨버터의 회로도
Fig. 8 Circuit of AC/DC Converter Using PZT

앞 절에서 서술한 압전변압기의 모델을 바탕으로 시뮬레이션을 수행하였다. PSIM 프로그램을 활용하였으며, 그림 8과 같이 AC/DC 컨버터에 압전변압기의 등가모형을 구성하였다. AC 정류부는 직류등가전원으로 대체하였고, 시뮬레이션 파라미터는 표2의 등가회로 파라미터와 동일하다. 인버터에 인가된 직류전압은 100[V]이다. 먼저 $R_o = 10[\Omega]$ 의 경우에 압전변압기의 1차측 및 2차측 전압을 그림 9에 나타내었다.

그림 9에서 압전변압기의 1차측 전압은 Half Bridge 인버터의 출력전압인 80[kHz]의 구형파임을 알 수 있고, 2차측 전압은 압전변압기의 특성에 의해 기본파 성분인 80[kHz]의 정현파전압을 얻을 수 있다.

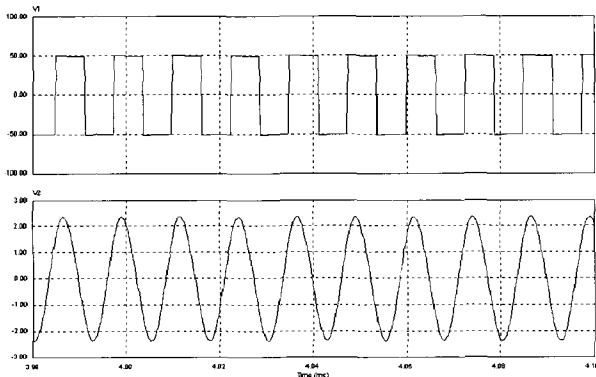


그림 9 압전변압기의 1차측 및 2차측전압파형
($R_o=10[\Omega]$)
Fig. 9 Primary & secondary voltage of PZT
($R_o=10[\Omega]$)

5. 시험결과

SMPS에 사용되어지는 Half Bridge Type의 AC/DC 컨버터를 이용하여 권선형 변압기 대신 압전변압기를 그림10과 같이 장착하여 시험하였다. 백-라이트용 압전변압기를 사용하였고, 그림과 같이 인버터의 출력측에 연결하여 시험하였다.

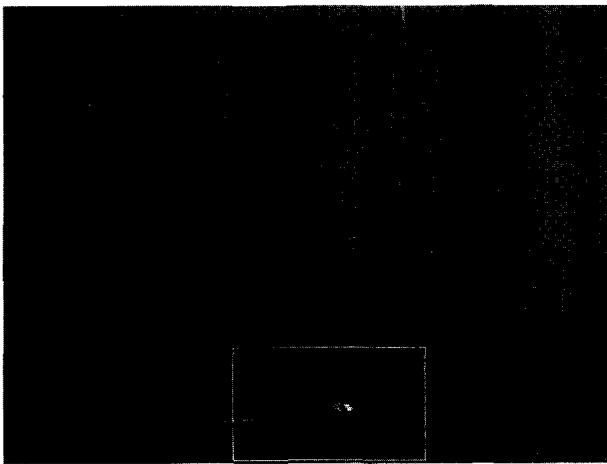


그림 10 시험장치 구성
Fig. 10 Circuit for experiment

압전변압기의 1, 2차측 전압은 그림 11과 같으며, 운전주파수는 공진주파수에 근접한 78[kHz]이다. 그림12는 정류된 출력직류전압을 나타내며, 이때 부하는 10[Ω]이다.

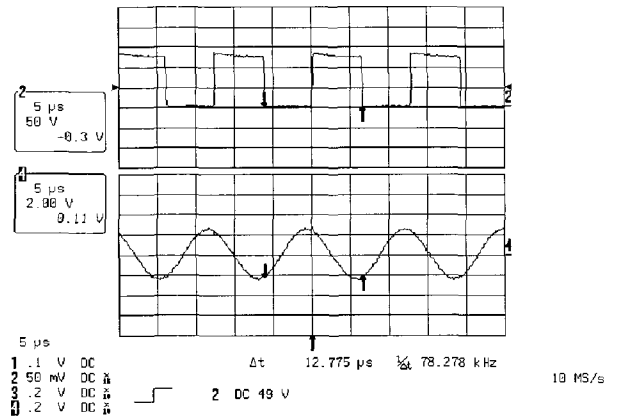


그림 11 압전변압기의 1, 2차측 전압
Fig. 11 Primary & secondary voltage of PZT

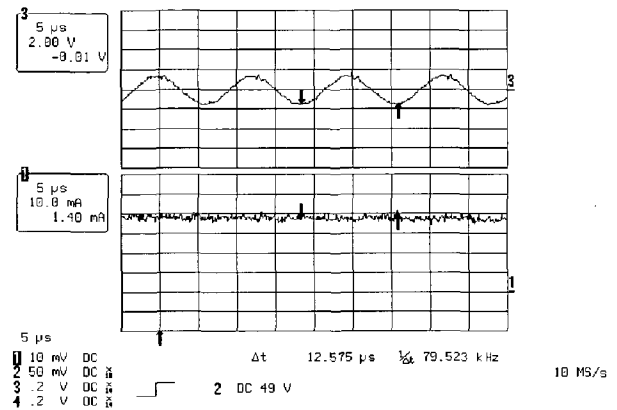


그림 12 압전변압기의 2차측 전압과 출력직류전압
Fig. 12 Secondary voltage of PZT and DC output voltage

6. 결론

본 논문에서는 압전변압기를 AC/DC 컨버터에 적용할 경우 등가회로에 의한 계산방법으로 전압전달특성 및 출력특성 등을 파악하고자 하였다. 이를 위해 LCD 백-라이트용 압전변압기를 대상으로 그 압전변압기의 물리적, 전기적 특성으로부터 파라미터를 추출하여 등가회로를 구성하였고, 이를 시뮬레이션과 실험을 통해 그 타당성을 확인하였다. 이 등가회로를 바탕으로 운전주파수 및 부하의 변동에 따른 제반 특성변화의 파악이 가능하다. 본 논문에서 사용한 압전변압기의 종류가 AC/DC 컨버터 용이 아닌 인버터용임으로 차후 연구로는 AC/DC용으로 설계한 압전변압기를 채용하여 본 논문에서 제시한 모델링 방법과 특성계산식을 이용하여 실험을 통해 확인하는 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Gregory Ivensky, Moshe Shvartsas, and Sam Ben-Yaakov, "Analysis and Modeling of a Piezoelectric Transformer in High Output Voltage Applications", *IEEE APEC 2000*, pp. 497~505, 2000.
- [2] Hamamura S., Kurose D., Ninomiya T., Yamamoto M., "New control method of piezoelectric transformer converter by PWM and PFM for wide range of input voltage", *IEEE CIEP 2000*, pp. 3~8, 2000.
- [3] Navas J., Bove T., Cobos J.A., Nuno F., Brebol K., "Miniaturized battery charger using piezoelectric transformers", *IEEE APEC 2001*, pp. 492~496, 2001.
- [4] Alou P., Cobos J.A., Sanz M., Prieto R., Uceda J., Rivas, M. Navas J., "Subharmonic driving: a new concept to drive piezoelectric transformers in power converters", *IEEE APEC 2001*, pp. 487~491, 2001.
- [5] Yamane T., Hamamura S., Zaitzu T., Minomiya T., Shoyama M., Fuda Y., "Efficiency improvement of piezoelectric-transformer DC-DC converter," *IEEE PESC 98*, pp. 1255~1261, 1998.
- [6] Zaitzu T., Fuda Y., Okabe Y. Ninomiya T., Hamamura S., Katsuno M., "New piezoelectric transformer converter for AC-adapter", *IEEE APEC97*, pp. 568~572, 1997.
- [7] Dieulesaint E., Royer D., Mazeroue D., Nowak P., "Piezoelectric transformers," *IEEE Electronics Letters*, Vol. 24, Issue 7, pp. 444~445, 1988.

이 논문은 학술진흥재단의 선도연구자 지원사업(KRF-99-041-D00102) 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

저 자 소 개



이정민(李政珉)

1973년 9월 17일생. 1997년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



이 석(李 碩)

1975년 1월 21일생. 1999년 건국대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~현재 (주)엑사텔레콤 선임연구원



이정락(李正洛)

1972년 4월 15일생. 1998년 건국대 전기학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~현재 (주)화인썬트로닉스 기술연구소 전임연구원



목형수(睦亨洙)

1963년 10월 31일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원(석사). 1992년 동 대학원 졸업(공학박). 1992년~1996년 서울산업대 제어계측공학과 조교수. 1997년~현재 건국대 전기공학과 교수. 당 학회 협력이사.