

# 집중 등가회로를 사용한 압전 변압기의 승압비 및 효율 해석

논문  
11-10-16

## Voltage Gain and Efficiency Analysis of Piezoelectric Transformer using Lumped Constant Equivalent Circuit.

류주현\*, 이용우\*, 윤광희\*, 정희승\*\*, 정영호\*\*\*, 박창엽\*\*\*\*  
(J-H Yoo, Y-W Lee, K-H Yoon, H-S Jung, Y-H Jung, C-Y Park)

### Abstract

The load characteristics on the voltage gain and efficiency were analyzed using a lumped constant equivalent circuit of the piezoelectric transformer. These analytical results were confirmed by experiments. Theoretical values of voltage gain were nearly constant with experimental ones. However, It was shown that theoretical values of efficiency is higher than experimental ones.

**Key Words(중요용어)** : Lumped Constant Equivalent Circuit(집중 등가회로), Voltage Gain(전압이득), Efficiency(효율), Piezoelectric Transformer(압전 변압기)

### 1. 서 론

압전 변압기가 1950년대 말에 개발된 이래 압전 변압기를 TV수신기의 고압전원등 높은 전압, 전력 인버터로 적용하려고 시도하였으나 고강도, 고전력 압전재료 물질의 부족으로 그동안 응용이 어려웠다. 그러나, 최근들어 고전력 압전재료 개발에 힘입어 일본에서 종래의 Rosen형 압전 변압기에서 수십-수백 배의 공진 주파수를 갖는 압전 변압기가 각 연구소 및 기업체에서 개발되어 일부는 휴대용 개인 컴퓨터의 액정 display에 이용되는 backlight구동용 고압전원으로 실용화가 되었다.<sup>1,2)</sup>

LCD는 backlight 조명을 위해 CCFL(냉음극관)을 사용한다. 특히, 노트북 컴퓨터에 이용되는 CCFL은 점등시에 1200Vrms정도를 필요로하나 정상동작에서는 약 300~500Vrms로 줄어든다. 종래의 전자식 변압기를 사용 할 때는 소형화나, 가격, 변환효율면에서 한계에 직면하고 있다. 더욱이 노트북 PC에 사용할 때에는 슬림화가 필요한데 전자식 변압기는 컴팩트화 하기가 매우 어렵다. 따라서, 높은 효율과 소형, 슬림화가 가능한 LCD backlight 인버터로 전 변압기가 응용되고 있다. 본 연구에서는  $Pb_{0.94}Ba_{0.06}(Zr_{0.52}Ti_{0.48})_{0.925}(Mn_{1/3}Nb_{2/3})_{0.075}O_3+0.5mol\%CeO_2$  세라믹을 제조하여 Rosen형의 압전변압기를 제작하고, 압전 변압기의 어드미턴스 원선도를 구하여 집중 등가회로의 제반 정수를 구한 다음 부하저항에 따른 승압비, 효율을 계산하고, 실제로 측정하여 비교분석하고자 한다.

\* :세명대학교 전기공학과  
(충북 제천시 신월동 , Fax: 0443-648-0868  
E-mail:Juhyun57@chollian.dacom.co.kr)

\*\* :주성대학 전기과

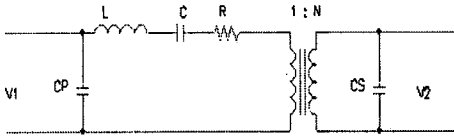
\*\*\* :전력연구원

\*\*\*\* :연세대학교 전기공학과

1998년 7월 23일 접수, 1998년 8월 31일 심사완료  
<'98 춘계학술회의에서 우수논문으로 추천됨>

### 2. 압전 변압기의 해석

#### 2.1 압전 변압기의 집중 등가회로



$C_p=831.79\text{pF}$ ,  $L=128\text{mH}$ ,  $C=34.29\text{pF}$ ,  $R=252\Omega$ ,  
 $N=9.4$ ,  $C_s=2.6\text{pF}$

그림 1. 압전 변압기의 집중 등가회로  
 Fig. 1. Lumped constant equivalent circuit of PT

압전 변압기의 공진점 근처에서의 전기등가회로는 그림 1과 같다. 이 회로에서 2차측을 단락하면 다음과 같이 된다.<sup>3)</sup>

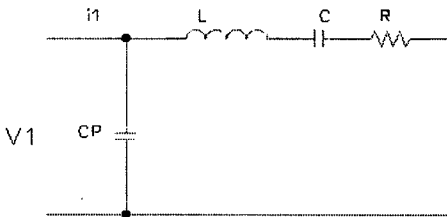


그림 2. 압전 변압기의 2차측을 단락할 경우의 등가 회로  
 Fig. 2. Equivalent circuit of PT with short circuiting the secondary terminals

그림 2의 등가회로에서의 어드미턴스는  

$$Y(\omega) = i_1(\omega)/v_1(\omega) = G(\omega) + jB(\omega) \quad (1)$$

$$(0 < \omega < \infty)$$

이 되고, 이를 계산하면

$$Y(\omega) = j\omega C_p + \frac{j\omega C(1 - \omega^2 LC) + \omega^2 RC^2}{(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2} \quad (2)$$

$\omega = \omega_0$ (공진 각주파수)에 대하여

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3)$$

공진 주파수에서의 어드미턴스는

$$Y(\omega_0) = j\omega_0 C_p + \frac{1}{R} \quad (4)$$

여기서, 어드미턴스 원선도로부터  $Y(\omega_0)$ 의 실수부와 허수부를 구하면 R과 Cp를 구할 수 있다. 또한 어드미턴스 원선도에서 허수부의 최대 최소점의 주파수를 고려하면 C와 L에 대한 값도 구할 수 있다.

$$C = \frac{1}{R} \frac{(\omega_H - \omega_L)}{\omega_H \omega_L} \quad (5)$$

$$L = R \frac{1}{(\omega_H - \omega_L)} \quad (6)$$

또한, 같은 방법으로 압전 변압기의 입력측을 단락하여 어드미턴스 원선도를 구하면 N과 Cs값도 구할 수 있다.

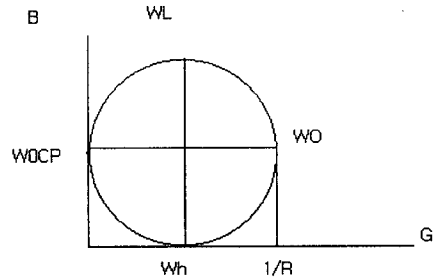
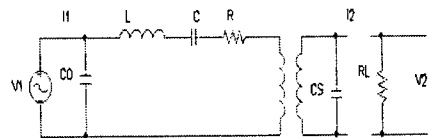


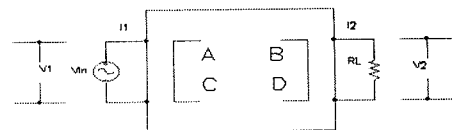
그림 3. 어드미턴스 원선도  
 Fig. 3. Admittance circle, relevant points

### 2.2 압전 변압기의 승압비와 효율

그림 4에서의 AC등가회로는 F행렬을 이용하면 계산이 용이해진다.



(a) AC 등가회로



(b) F 행렬

그림 4. AC등가회로와 F행렬  
 Fig. 4. AC equivalent circuit and F-matrix

여기서 입력 전압  $v_1$ , 입력전류  $i_1$ , 출력전압  $v_2$ , 출력전류  $i_2$ 의 심볼은 각각  $V_1, I_1, V_2, I_2$ 로 표현한다.

그림 4(a)의 F행렬 표시법은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, F행렬의 요소는 다음식으로 표현된다.

$$F = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (8) \text{에서}$$

A B C D parameter를 구하여 (7)식에서 승압비 G를 구하면

$$G = \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{N} \left( \frac{1}{\frac{1}{N^2} + \left(\frac{C_s}{C} - \omega^2 LC_s\right) + \frac{R}{R_L} + j\omega\left[C_s R + \frac{L}{R_L}\right] - \frac{1}{\omega CR_L}} \right) \quad (9)$$

그러므로,  $|G(j\omega)| =$

$$\frac{1}{N} \left( \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{N^2} + \frac{C_s}{C} - \omega^2 LC_s + \frac{R}{R_L}\right)^2 + \left(\omega\left[RC_s + \frac{L}{R_L}\right] - \frac{1}{\omega R_L C}\right)^2}} \right) \quad (10) \text{식이 된다.}$$

또한,  $V_2$ 는  $V_2 = I_2 R_L$  이므로

$$\frac{V_1}{I_1} = \frac{(AR_L + B)I_2}{(CR_L + D)I_2} = Z_{in} \quad (11) \text{이 되며,}$$

입력전력  $P_{in}$ 은,  $P_{in} = \text{Real} \frac{CR_L + D}{AR_L + B} |V_1|^2$   
 -(12)이 된다.

출력전력  $P_0$ 는  $P_0 = I_2^2 R_L = \left(\frac{I_1}{CR_L + D}\right)^2 R_L$   
 $= \frac{V_1^2}{|AR_L + B|^2} R_L \quad (13)$

이때 또한, 효율은

$$\eta = P_0/P_{in} \times 100[\%] \quad (14)$$

이 된다.

### 3. 실험

#### 3-1 시편제조 및 압전특성측정.

산화물 혼합법을 사용하여  $Pb_{0.94}Ba_{0.06}(Zr_{0.52}Ti_{0.48})_{0.925}(Mn_{1/3}Nb_{2/3})_{0.075}O_3 + 0.5\text{mol}\%CeO_2$  조성 세라믹스

소자를 1260°C에서 2시간 제조 하였다. 제조된 시편의 제반특성은 표 1과 같다. 소성이 끝난 시편은 snd paper와 SiC분말을 사용하여 1mm의 두께로 연마한 다음 초음파 세척기로 아세톤 속에서 세척한 다음 듀폰사의 실버페이스트 #7095를 600°C에서 10분간 열처리하여 전극을 형성시켰다.

표 1. 시편의 제특성

Table 1. Characteristics of sample.

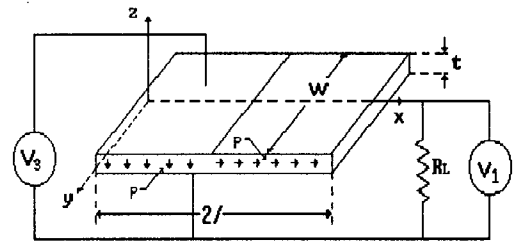
Sample No	density (g/cm <sup>3</sup> )	Curie temp. [°C]	dielectric constant	Ec (kV/cm)	Pr (μC/cm <sup>2</sup> )
S	7.48	322	779	10.74	7.76

k <sub>p</sub>	k <sub>31</sub>	k <sub>33</sub>	d <sub>33</sub> [10 <sup>-12</sup> C/N]	d <sub>31</sub> [10 <sup>-12</sup> C/N]	S <sub>11</sub> <sup>E</sup> [10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /N]	Q <sub>m</sub>
0.53	0.305	0.64	-246	82.51	10.605	1285

전극 부착이 완료된 시편들은 실리콘 유속에서 25kV/cm의 전계를 30분간 가하여 분극처리를하여 Impedance Analyzer(HP4194A)로 공진, 반공진 주파수를 측정하여 제반 압전특성을 측정하였다.

#### 3-2 압전 변압기의 제작 및 특성측정



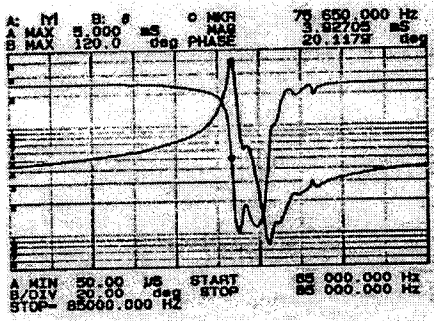
$U_3$ : 구동전압  
 $U_1$ : 부하저항  $R_L$ 의 양단에 발생하는 출력전압

그림 5. 제작된 압전 변압기의 측정회로  
 Fig. 5. Measuring circuit of fabricated PT

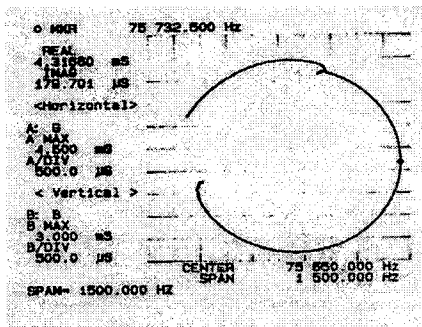
압전 변압기는 그림 5에서 Rosen형구조의 10mm × 46mm × 1.63mm 크기로 제작하여 두께 및 길이방향으로 각각 25kV/cm, 15kV/cm의 전계를 150°C 실리콘유에서 각각 30분 인가하여 분극처리를 하였다. 분극처리된 압전 변압기는 하루 경과후에 제반 특성을 측정 하였다. 압전 변압기의 승압비와 효율을

측정하기 위해 그림 5의 회로를 이용하였다. 이때의 입력전류는 저항단자 10Ω을 입력측에 연결하고, 오실로스코프(Recory1015)로 측정하였으며 출력전압도 부하저항에서 동시에 측정하였다. 또한 압전 변압기의 집중등가회로 정수를 구하기 위해서 Impedance Analyzer(HP4194A)로 주파수변화에 따른 어드미턴스를 구하였으며, 또한 어드미턴스 원선도를 같이 구하였다.

#### 4. 결과 및 고찰



(a)어드미턴스



(b)어드미턴스원선도

그림 6. 입력측에서 들여다본 어드미턴스와 원선도  
Fig. 6. Admittance and Admittance circle with short-circuiting the secondary terminal

압전 변압기는 분극반전형, 3차 중모드형 등 여러 형태가 있으나 그림 5의 장방형 Rosen형 구조가 간단하고, 제작이 용이하여 보편적으로 널리 이용되고 있다. 입력부에 압전 변압기의 공진주파수에 해당되

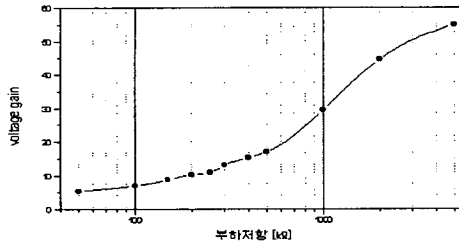
는 AC신호를 인가하게 되면, 전기기계 결합계수  $k_{31}$ 에 의해 길이방향으로 크게 진동을 유기하게 되며, 이 진동에너지가 전기기계 결합계수  $k_{33}$ 에 의해 종방향으로 전달되어, 압전효과에 의해 출력부에 고전압이 발생하게 된다. 압전 변압기는 Rosen형에서  $\lambda/2$ ,  $\lambda$ ,  $3\lambda/2$  모드로 각각 진동이 가능한데, 일반적으로 입력부의 증압부와 출력부의 증압부에 응력이 최대로 걸리고 변위가 최소로 되는  $\lambda$ 모드가  $\lambda/2$ 모드 보다 많이 이용되고 있다. 그 이유는  $\lambda/2$  모드를 이용할시의 응력이 구동부와 출력부에 증압에 집중되게 되어, 분극이 교차되는 부분에서 파괴가 잘 일어나기 때문이다.  $\lambda$ 모드에서는 실제로 구동부 증압, 출력부 증압 부분이므로 이러한 문제가 해결되고, 또는 지지를 이 부분에 하게되면 안정하기 때문이다. 또한,  $3\lambda/2$  모드로도 여진이 가능한데 이때의 진동은  $\lambda/2$ 와  $\lambda$ 모드에 비해 진동이 매우 약하기 때문에 이용이 되지 않는다. 따라서, 본 연구에서는  $\lambda$ 모드로 진동하게 하였으며, 이때의 공진주파수  $f_r$ <sup>4)</sup>은

$$f_r = \frac{1}{2N\sqrt{\rho s_{11}^E}} \quad \text{여기서, } 2l: \text{ 전체변압기 길이,}$$

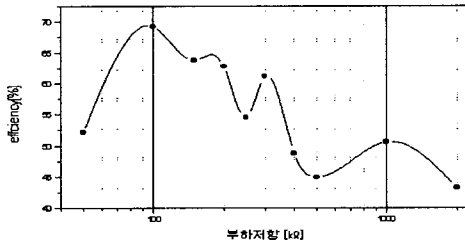
$\rho$ : 밀도,  $s_{11}^E$ : compliance

로 되므로, 이식에 근거하여 압전트랜스포머를 설계 제작하여 제반특성을 고찰하였다.

그림 6(a),(b)는 압전 변압기의 출력측을 단락하여 측정된 어드미턴스와 어드미턴스원선도이다. 이때의 공진주파수는 75.65kHz, 반공진주파수는 77.45kHz를 나타내었다. 또한 마찬가지로 압전 변압기의 입력측을 단락하여 측정된 결과 공진주파수는 75.7kHz, 반공진주파수는 81.8kHz이며 이때의 공진저항은 20.6kΩ을 나타내었다. 만약 부하저항을 연결 하였을때 높은 전류를 출력측에서 꺼내기 위해서는 이저항을 낮게 하도록 설계해야 한다. 그림 7 (a)와 (b)는 부하저항에 따른 승압비와 효율의 측정치를 나타낸 것이다. 부하저항 증가에 따라 승압비는 증가하였으며, 효율은 100kΩ이었을 때가 70%로 가장 높게 나타내었다. 노트북용 LCD backlight 구동시에 점등 개시에는 부하가 커 1200Vrms로 높은 전압이 필요 시 된다. 일단 점등후에는 300~500Vrms의 전압만 필요로 하게 된다. 이때의 부하저항은 약 80~100kΩ으로 되기 때문에 이때의 효율이 중요하다.<sup>5)</sup>따라서 본 연구에서 제작된 압전 변압기를 노트북용 LCD backlight에 적용가능하리라 생각된다.

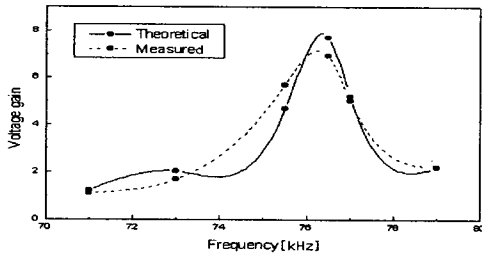


(a)

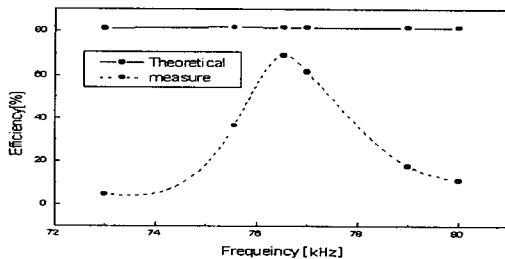


(b)

그림 7. 부하저항에 따른 승압비와 효율의 측정치  
Fig. 7. Measuring values of voltage gain and efficiency with load resistance



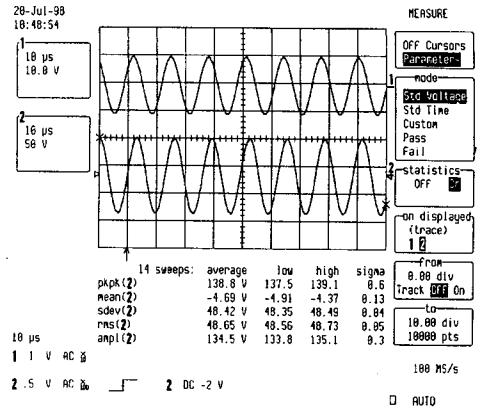
(a) 승압비



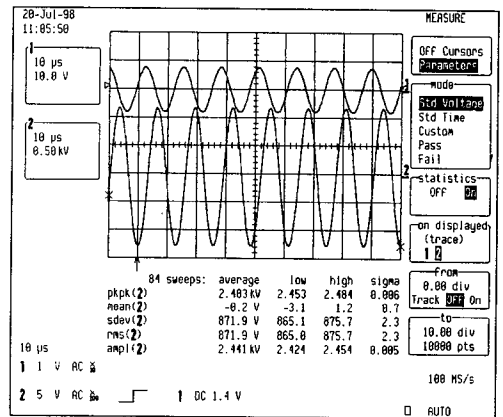
(b) 효율

그림 8. 부하저항 100kΩ에서의 승압비,효율의 이론 및 측정치

Fig. 8. Theoretical and measuring values of voltage gain and efficiency at 100kΩ load resistance



(a) 부하저항100kΩ



(b)무부하

그림 10. 부하저항 100kΩ과 무부하에서의 압전트랜스 포머의 입(1),출력(2)특성

Fig. 10. Input and output properties of PT at 100 kΩ and no load

그림 8, 그림 9와 표 2는 부하저항에 따른 승압비와 효율의 측정치와 이론치를 나타낸 것이다. 본 집중등가회로로 해석한 결과 공진주파수 근방에서는 승압비가 이론치와 측정치가 비교적 잘 일치하나, 공진주파수를 벗어나게 되면 잘 일치되지 않음을 알수 있었다. 이는 집중등가회로가 공진주파수 근방에서의 회로로 해석한 것이기 때문으로, 공진주파수에서 많이 벗어나면 이론치와 측정치가 다소 일치하지 않게되기 때문이다. 또한 효율은 이론치가 80%이상으로 높은 값을 나타낸데 이어, 측정치는

표 2. 부하저항에 따른 공진주파수와 최대 승압비 및 효율

Table 2. Resonance frequency and maximum voltage gain and efficiency according to load resistance

저항 [kΩ]	이론치			측정치		
	승압비	효율 [%]	공진 주파수	승압비	효율 [%]	공진 주파수
50	6.5	69	76	5.4	52	75.32
100	7.71	81	76.1	6.7	70	76.5
150	8.28	86	76.2	8.64	64	76.5
200	8.66	89	76.3	10.16	63	76.6

50~70%로 20~30%의 오차를 나타내었다. 그림10은 부하저항 100kΩ과 무부하에서의 압전변압기의 입출력 특성을 나타낸 것이다.

100kΩ에서 승압비( $V_{out}/V_{in} = 48.7/7.2$ )로 6.7배, 무부하에서 ( $V_{out}/V_{in} = 871/5.55$ )로 157배를 나타내었다. 본 연구에서 압전 변압기를 구동시킨 것이 Function generator로 구동시켜 충분한 전력을 공급하지 못한점과 측정시에 회로부에서의 손실등을 고려하지 않았기 때문이다. 따라서, 효율에 대한 측정방법에 대해서는 추후에 더욱 연구가 있어야 한다고 생각된다.

### 5. 결 론

Rosen형으로 압전 변압기를 제작하여 입력 및 출력 어드미턴스 및 어드미턴스 원선도를 구하여 집중등가회로의 제반등가회로 정수를 구한다음 부하저항에 따른 승압비와 효율을 시뮬레이션 및 측정된 결과는 다음과 같다.

1. 부하저항 증가에 따라 승압비와 공진주파수는 증가하였다.

2. 효율은 측정치가 이론치 보다 20-30%의 낮은 값을 나타내었다.
3. 승압비는 이론치와 측정치가 비교적 잘 일치하였다.
4. 무부하에서의 승압비는 157배, 부하저항 100kΩ에서 6.7배로 나타났다.

본 실험에서는 LCD backlight inverter 로 적용하고자 Rosen형 압전 변압기의 승압비, 효율 특성을 제시하였다. 공진주파수 근방에서의 승압비는 이론치와 거의 일치하였으나, 효율은 많은 오차가 나타남을 확인하였다. 따라서, 이에 대한 추후 보완연구를 하여 LCD backlight inverter 로에 응용 가능성을 제시하고자 한다.

### 6. 참 고 문 헌

1. T. Zaitso, O. Ohnishi, T. Inoue, M. Shoyama, T. Ninomiya, F. C. Lee, "Piezoelectric Transformer Operating in Thickness Extensional Vibration and its Application to Switching Converter" IEEE PESC Record pp.585-595, 1994
2. M. Shoyama, K. Hirikoshi, T. Ninomiya, T. Zaitso, Y. Sasaki, "Steady-state characteristics of the push-pull piezoelectric inverter" IEEE PESC Record pp.715-721, 1997
3. P. J. M. Smidt, J. L. Duarte "Powering Neon lamps Through Piezoelectric Transformers" IEEE PESC Record pp.310-315, 1996
4. C. A. Rosen, "Ceramic Transformer and filters." Electronic Comp. Symp. Proc, pp.205-211, 1956
5. S. Kawashima, O. Ohnishi, H. Hakamata, S. Tagami, A., Fukuoka, T. Inoue, S. Hirose, "Third Order Longitudinal Mode Piezoelectric Ceramic Transformer and Its Application to High-Voltage Power Inverter", IEEE Ultrasonics Symposium, pp.525-530, 1994