

압전 트랜스포머를 이용한 전력변환기 회로

(한양대학교 공학대학 전기공학과 부교수)

1. 서론

초고속 정보통신망의 실현으로 대변되는 전자정보화 시대에 있어서 정보통신기기에 대한 소형·경량화, 박형화의 추세는 그 끝이 보이지 않을 정도로 빠른 진행을 보이고 있다. 한편 이러한 정보통신기기에 있어서 전력의 안정적인 공급을 담당하는 전력변환기회로는 트랜스포머, 인덕터 등의 자기소자의 존재로 인하여 만족할 만큼의 소형·경량·박형화는 이루어지지 않고 있는 실정이다.

최근, 강자성체의 코어에서 권선을 감은 기존의 전자(電磁)형 트랜스포머 대신에, 사이즈를 대폭 저감할 수 있는 소자로서 세라믹 소자 등의 압전효과를 이용한 압전 트랜스포머(Piezoelectric Transformer)가 주목되고 있다. 압전 트랜스포머는 1차측에서 가한 전기진동을 일단 기계 진동으로 변환하여 2차측에 전달하면 2차측에서 이것을 전기진동으로 환원시킴으로써 전기에너지를 전송하게 된다. 압전 트랜스포머는 권선이 존재하지 않으므로 구조가 간단하고 소형·경량화, 박형화가 가능하다는 점, 표피·근접효과가 없어서 고주파화에 유리하다는 점, 전자(電磁) 노이즈가 발생하지 않는다는 점 등의 장점을 갖고 있다. 그러나 압전 트랜스포머의 전력 변환기회로에의 응용에는 구동방법이 어렵다는 점, 1·2차간 송압비가 주파수 및 부하저항에 의해 변한다는 점, 해석이 어렵다는 점 등의 단점도 갖고 있으나 충분히 해결이 가능한 문제이다.

압전 트랜스포머의 전력 변환기회로에의 응용은 크게 두 가지 방향으로 구분할 수 있다. 고압용 인버터와 저압용 DC-DC 컨버터에의 응용이다. 압전 트랜스포머를 이용한 고압용 인버터는 이미 실용화 단계에 와 있어서 시제품이 생산되고 있으며 저압용 DC-DC 컨버터에의 응용에 있어서도 MHz대의 스위칭 주파수를 갖는 고주파용 컨버터가 활발하게 연구되고 있다.

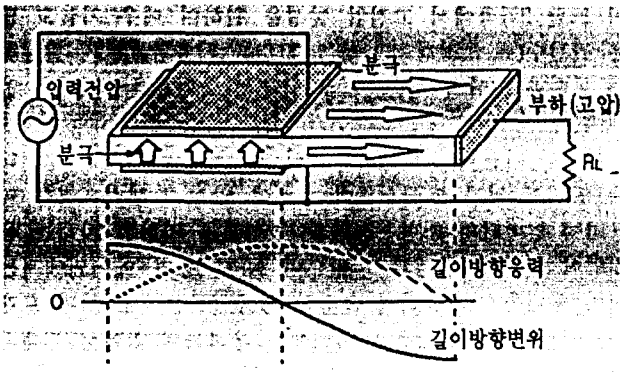
본고에서는 우선 압전 트랜스포머의 특징에 대하여 설명하고, 고압용 인버터에의 응용, 저압용 DC-DC 컨버터에의

응용, 결론의 순서로 해설하고자 한다.

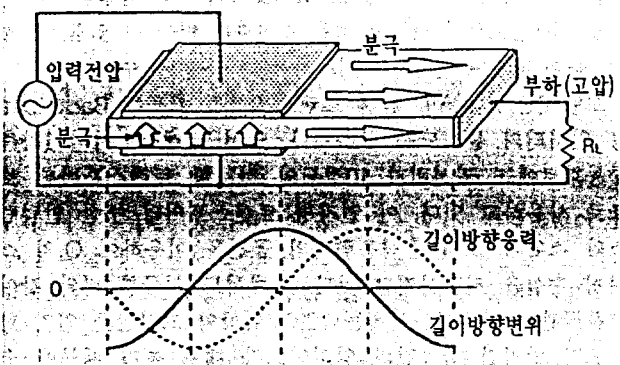
2. 압전 트랜스포머

압전 트랜스포머는 1956년 C.A. Rosen에 의해 최초로 제안되었다. 압전 효과라는 물리현상을 이용하는 것으로서 분극된 소자에 외력을 가해 변형시키면 전압이 발생하고 반대로 전압을 가하면 응력이 발생하여 변형된다. 이러한 현상을 적극적으로 이용하여 1차측에서 전기진동을 일단 기계진동으로 바꾸어 2차측에 전달하고, 2차측에서 그것을 전기진동으로 환원시킴으로써 전기에너지를 전송할 수 있게 한다. 또한 에너지를 전송할때 전압의 승·강압, 1·2차간의 절연 문제 등 종래의 전자(電磁)형 트랜스포머와 동일한 기능이 실현된다.

그림 1은 고압용 인버터에 이용되는 Rosen형 압전 트랜스포머의 구조와 진동모드를 나타낸다. 재료로서는 PZT(티탄산 질코늄산염)계의 세라믹 재료, LiNbO₃ (리오브산리튬)의 단결정등을 이용한다. 그림에서 (a)는 1차모드, (b)는 2차모드로 구분된다. 전체적으로 보았을때 압전 세라믹판의 형태로 구성되고 있으며 왼쪽이 구동부 오른쪽이 발전부로 되어 있다. 구동부는 두께 방향으로 분극된 압전 세라믹판의 상하에 전극을 배치하고 있고, 발전부는 길이 방향으로 분극된 압전세라믹판의 단면에 전극을 배치하고 있다. 구동부의 전극 사이에 교류전압을 인가하면 압전효과에 의해 기계적인 왜곡이 발생하고 이것이 길이 방향의 파형을 발생시킨다. 이 길이 방향의 진동은 압전 세라믹판의 길이와 기계적 정수에 의해 결정되는 공진주파수로 공진하고 이때 발전부에서도 큰 왜곡이 생기기 때문에 압전 효과에 의해 고전압이 발생하게 된다. 그림 2는 저압용 DC-DC컨버터에 이용되는 두께방향 진동형(thickness extentional vibration) 압전 트랜스포머의 구조와 진동 모드를 나타낸다. 입력과 출력측은 각각 압전 재료의 단층으로 구성되고 있다. 각 단층에서 화살표는 분극방향을 나타낸다. 또 각 단층의 중간



(a) 1차모드



(b) 2차모드

그림 1. Rosen형 압전 트랜스포머의 구조와 진동모드

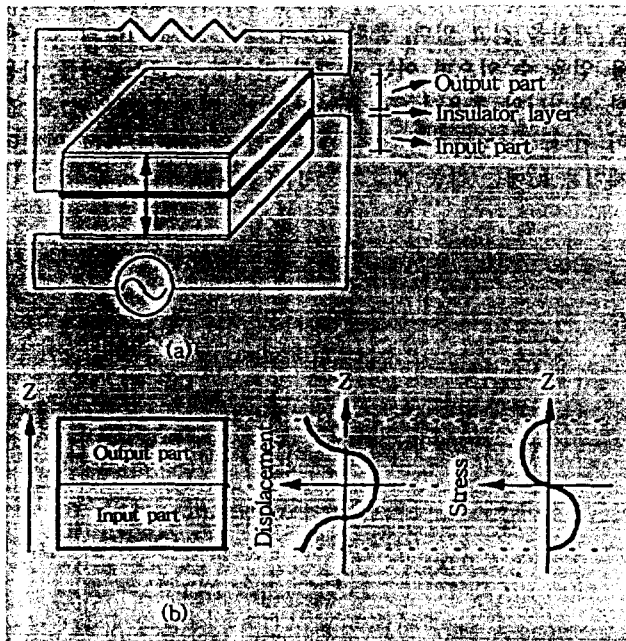


그림 2. 두계방향진동형 압전 트랜스포머의 구조와 진동모드

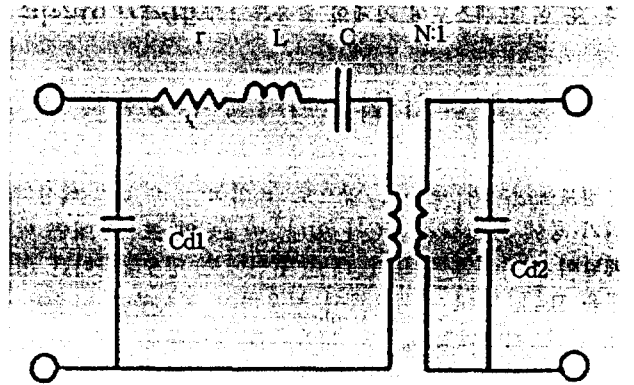


그림 3. 집중정수 등가회로

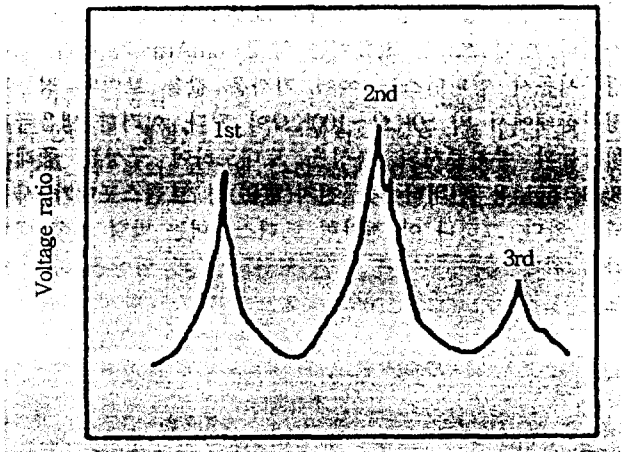
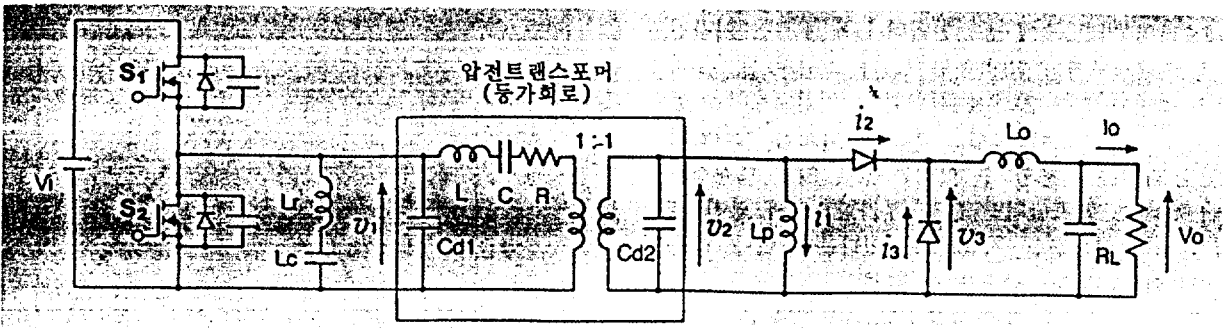


그림 4. 압전 트랜스포머의 입출력 전압비

에는 절연층이 존재한다. 입력 단자에 교류 전압을 인가함으로써 두계방향진동이 일어나게 된다. 이 기계적 진동이 출력측으로 전달되고, 출력측에서 전기적 진동으로 나타나게 된다. 권선비(N)는 입력부와 출력부의 두계비와 같다. 그림 2는 1:1의 경우를 나타낸다. 권선비는 입력층과 출력층의 두계비를 바꿈으로써 조절할 수 있다. 그림 2(b)는 두계방향진동의 2차모드의 변위와 입력분포를 보여주고 있다. 절연층인 경계 영역에서 입력은 0으로 되고 있음을 알 수 있다. 따라서 이 2차모드가 전력전송에 가장 적합함을 알 수 있다.

그림 3은 이 압전 트랜스포머의 집중정수 등가회로를 나타낸다. 이 그림으로부터 압전 트랜스포머는 2가지 특성을 갖고 있음을 알 수 있다. 첫째는 대역통과 필터의 특성이고 둘째는 변압기의 특성으로서 두 가지 특성을 동시에 보이게 된다. 그림 4는 입출력단자에서 측정된 입출력 전압비를 나타낸다. 이 그림으로부터 2차모드인 경우가 다른 모드에 비해 가장 이득이 높다는 것을 알 수 있다. 2차 모드에 있어서 등가회로의 각 파라미터 값은 $C_{d1}=C_{d2}=470\text{pF}$, $L=0.31\text{mH}$, $C=47\text{pF}$, $r=40\Omega$ 이고 트랜스포머의 크기는 $20 \times 20 \times 3.2\text{mm}^3$ 이



Parameters : $L = 0.31\text{mH}$, $R = 40\ \Omega$
 $C = 47\text{pF}$, $Cd1 = Cd2 = 470\text{pF}$

그림 7. 압전 트랜스포머를 이용한 ZVS DC-DC 컨버터

4. 저압용 DC-DC 컨버터에의 응용

전자정보기기용 전원회로 중에서 출력전압이 수V~수십 V의 저압용 DC-DC컨버터에도 소형·박형·경량화에의 요구가 나날이 높아지고 있다. 이러한 요구에 부응할 수 있는 방법으로는 스위칭 주파수를 MHz대 까지 올리고 고주파화하여 트랜스포머, 인덕터 등의 자기(磁氣) 부품을 소형·경량화 할 필요가 있다. 그러나 종래의 전자형 트랜스포머는 권선의 표피효과와 근접효과에 의하여 고주파 영역에서의 교류저항이 현저하게 증가하고 코어의 고주파 손실도 증가하기 때문에 변환 효율이 저하하게 된다. 따라서 실용 레벨에서의 스위칭 주파수는 500KHz가 상한으로 되고 있다. 이 문제를 해결하기위해 저압용 DC-DC컨버터의 트랜스포머에도 압전 트랜스포머를 이용하는 방법이 검토되고 있어

현재 실용화를 목표로 개발 중에 있다. 그림 7은 압전 트랜스포머를 이용한 영전압 스위칭(zero voltage switching : 이하 ZVS로 칭함) DC-DC컨버터의 회로도를 나타내고 그림 8은 각 부의 파형을 나타낸다. 회로 동작을 살펴보면

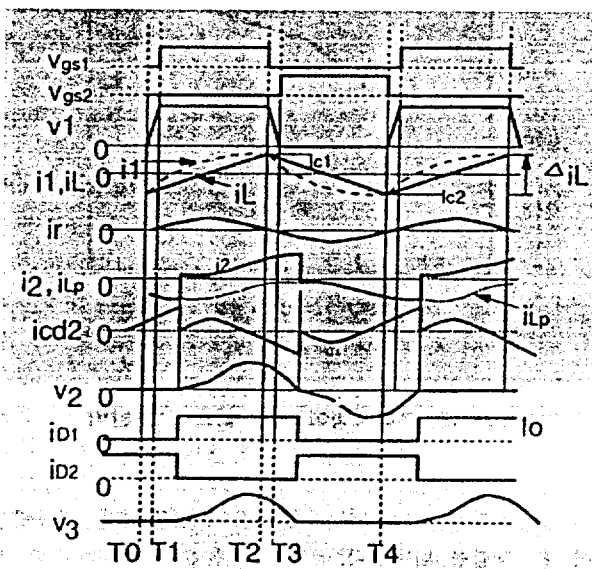


그림 8. 각 부의 파형

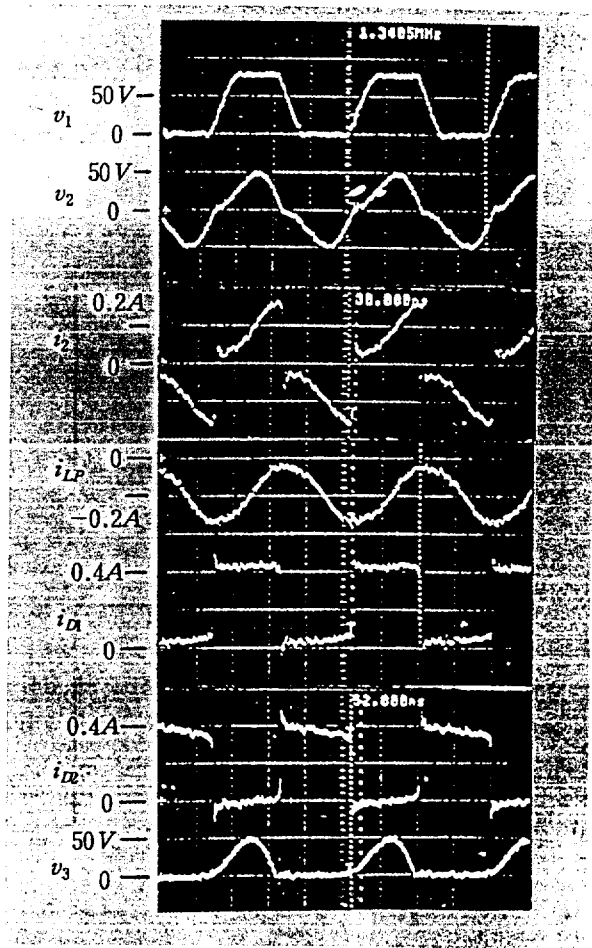


그림 9. 각 부의 실험파형

데드타임을 갖는 2개의 스위치 S_1, S_2 를 번갈아 ON, OFF 시키고 데드타임 기간 중에 공진인덕터 L_r 에 흐르는 여자전류로 압전 트랜스포머의 입력용량 C_{di} 과 스위치 S_1, S_2 의 출력용량을 충방전 하여 ZVS를 실현한다. 잇점으로서 공진전압이 입력전압 V_{in} 에 클램프 되므로 비교적 저내압의 MOSFET 스위치를 사용할 수 있다는 점과 압전 트랜스포머의 출력 측에도 공진인덕터 L_r 를 부가함으로써 압전 트랜스포머 내의 순환전류를 저감할 수 있다는 점이다. 다음과 같은 입출력 조건에서 실험을 한 결과

입력전압 : $V_{in}=80V$ dc, 출력전압 : $V_o=10\sim 20V$ dc

출력전력 : $P_o = 1\sim 5W$, 스위칭 주파수 : 약 1.3MHz

각부의 실험 파형을 그림 9에 나타내는데 부하저항 $R_c=28\Omega$ 이고 스위칭 주파수 $f_s=1.35MHz$ 에 대한 결과이다. 그리고 부하저항에 대한 효율, 출력전압, 출력전압의 측정치의 결과를 그림 10에 나타낸다.

부하저항 $R_L=55\Omega$, 출력전압 $V_o=10.8V$, 출력전력 $P_o = 3W$ 에서 78%의 높은 효율을 보여준다. 부하변동에 따라 각 부하저항에서 최대 출력전압을 유지하도록 스위칭 주파수를 바꿀 수 있다.

그림 11은 $R_c=28\Omega$ 에서 스위칭 주파수에 대한 효율과 출력전력의 결과를 나타낸다. 또한 그림 12는 부하저항에 대한 컨버터의 입출력 변환비를 나타낸다.

그림 11의 결과를 보면 스위칭 주파수가 공진점(약 1.35MHz)에서 벗어나면 효율이 급격히 변화해버림을 알 수 있다. 이것은 출력전력이 저하해도 압전 트랜스포머의 순환전류가

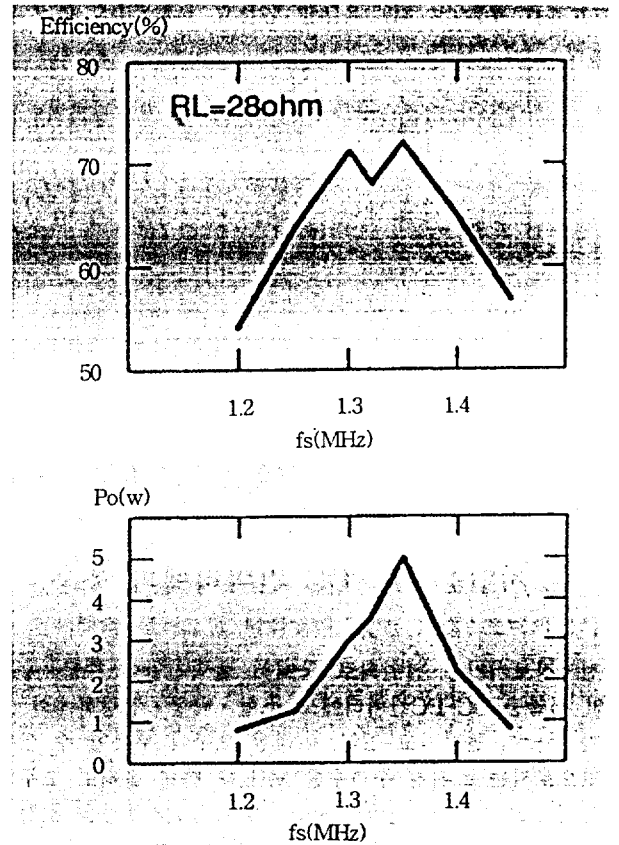


그림 11. 스위칭 주파수에 대한 효율, 출력전력

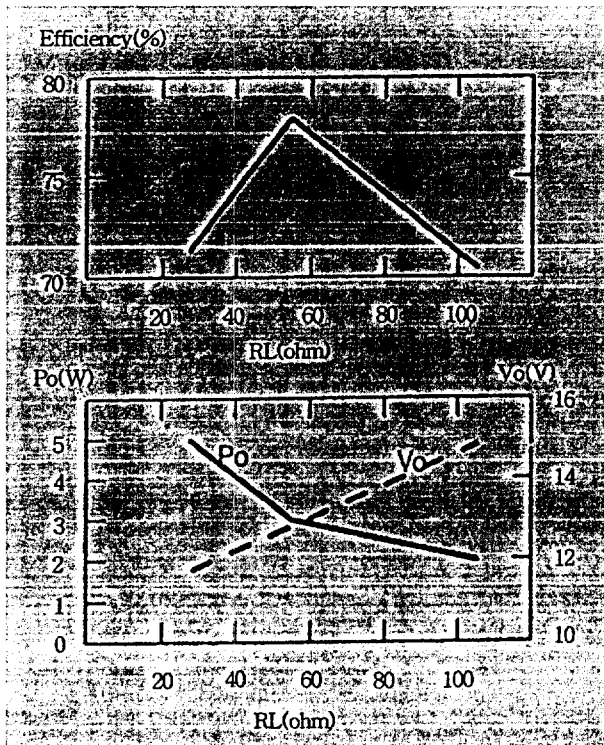


그림 10. 부하저항에 대한 효율, 출력전력, 출력전압

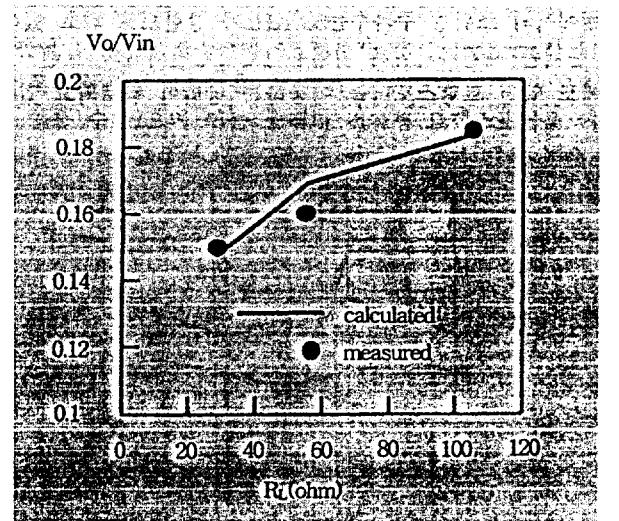


그림 12. 부하저항에 대한 입출력 변환비

계속 흐르기 때문이다. 이는 출력을 고효율에서 제어하는 것이 불가능함을 의미한다.

이러한 단점을 극복하기위해 그림 13에 나타내는 것처럼 그림 7의 컨버터 회로의 압전 트랜스포머 앞단에 공진용

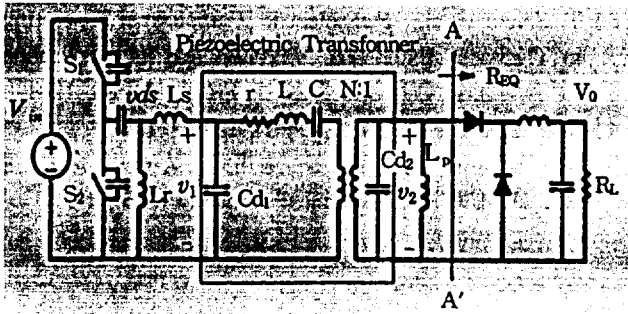


그림 13. 개선된 ZVS DC-DC 컨버터

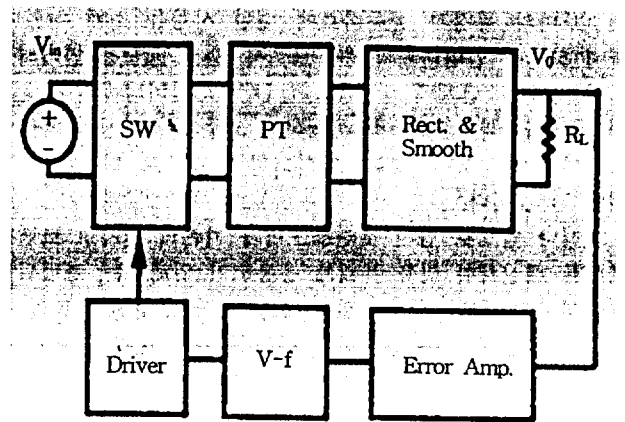


그림 15. 출력전압 제어의 출력도

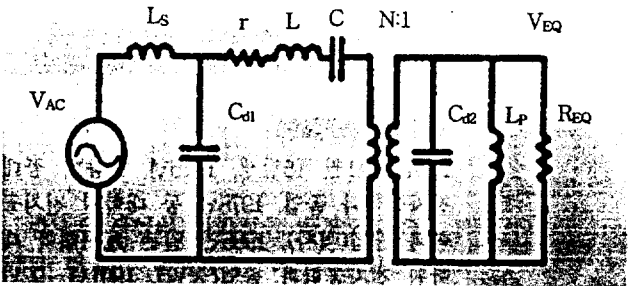


그림 14. 등가회로

인덕터 L_s 를 삽입하고 이 인덕턴스를 최적치로 설정함으로써 고효율로 출력전압을 제어 할 수 있게 된다. 그림 14는 이 컨버터 회로의 등가회로를 나타내며 효율의 관점에서부터 L_s 및 L_p 의 값은 공진상태의 근방에서 설정하는 것이 좋으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_s = \frac{1}{\omega_0^2 C_{d1}} \quad (1)$$

$$L_p = \frac{1}{\omega_0^2 C_{d2}} \quad (2)$$

여기서

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

그림 16은 입력전압 $V_{in}=30V$, 출력전압 $V_o=5V$ 의 압전 트랜스포머 ZVS DC-DC 컨버터회로에 대한 실험 결과를 나타낸다. 부하전류가 0.5A에서 2A로 변화하는데 대하여 주파수가 2.07~1.95MHz범위에서 출력전압을 제어하고 효율은 75% 이상이 됨을 알 수 있다.

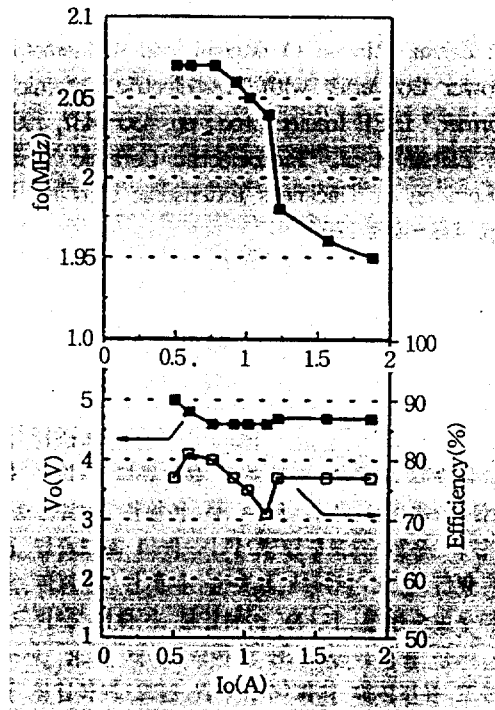


그림 16. 부하특성

5. 결 언

전력 변환기 회로에 있어서 기존의 전자형 트랜스포머를 대체하여 소형·경량화 및 박형화를 기할 수 있는 압전 트

랜스포머의 특징과 응용회로에 대한 사항을 소개 하였다. 특히 고압용 인버터에의 응용으로서 Back light용 인버터는 이미 실용화 단계에 와 있으며 DC-DC컨버터에의 응용도 ZVS의 기술과 접목되어 MHz대의 고주파 스위칭이 가능함으로써 한층 소형·경량·박형화의 방향으로 연구가 진행되어 갈 것이다.

그러나 앞으로 압전 트랜스포머가 기존의 전자형 트랜스포머를 대신하여 더욱 폭넓게 응용되기 위해서는, 광범위한 제어회로의 개발, 해석 및 설계 수법의 확립, 압전 재료의 전송능력 향상 및 저손실화 등의 여러 문제가 해결 되어야 할 것이며 이러한 문제의 해결은 회로 기술과 재료 기술의 유기적인 결합을 통해서 실현 될 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] T. Zaitzu, T.Inoue, O. ohnishi, and A. Inamoto, "2MHz Power Converter with Piezoelectric Ceramic Transformer," IEEE Intelec proc., pp. 430~437, 1992
- [2] T. Zaitzu et al., "Piezoelectric Ceramic Transformer Operating in Thickness Extensional symposium Proc.," pp. 438~488, 1992

- [3] T. Zaitzu et al., "Piezoelectric Transformer Operating in Thickness Extensional Vibration and its Application to Switching Converter", IEEE PESC Record, 1994
- [4] 월간 전자기술 동향 pp. 79~89, 1995년 12월호
- [5] M. Shoyama, "壓電トランスを用いたスイッチング" 電源", 日本能率協會 Technical seminar, 1995年3月

저 자 소 개



김희준(金熙峻)

1954년 11월 16일생. 1976년 한양대 공대 전자공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1986년 일본 九州대학 대학원 전자공학과 졸업(공학박). 1991년~92년 미국 버지니아 공대 방문교수. 현재 한양대 공대 전기공학과 부교수. 당학회 편집위원.