

전력용 압전 변압기 구동을 위한 저가형 클래스-E 컨버터

김 태 일 , 박 종 후 , 이 상 민 , 최 성 진 , 조 보 형
 서울대학교 전력 전자 시스템 연구실

Low Cost Class-E Converter for Power Conversion Operation of Piezoelectric Transformer

T. I. Kim , J. H. Park , S. M. Lee, S. J. Choi , B. H. Cho
 school of Electrical Engineering Seoul National University

ABSTRACT

This paper proposes the Low Cost Class-E Converter with Power Conversion Operation of Piezoelectric Transformer. The Power Piezoelectric transformer capacity used in the proposed circuit is 15W and the electric equivalent circuit is presented. Class E type converter has some merits such as small component count, small size, and low cost. The topology has also ZVS conditions for main switch, thus in efficiency aspect, it is also competitive for commercial feasibility. The analysis and design guideline are suggested and also they are verified by experimental results.

1. 서 론

압전 변압기(Piezoelectric transformer ; PT)의 경우 일반적으로 신호레벨에서 사용되어 왔으며, 파워레벨에서 적용을 위한 압전 변압기 연구는 90년대에야 비로소 활성화되기 시작했다. 압전 변압기는 기존의 마그네틱 변압기에 비해 권선이 없고, 작고 가벼우며, 전자기적 노이즈 특성이 좋으며, 발화성이 없는 장점을 갖는다. 따라서 마그네틱 변압기 대신 압전 변압기를 사용시 회로의 프로파일을 낮추고 소형화하는데 여러 가지 잇점이 존재한다.

압전 변압기는 크게 승압형과 강압형으로 나눌 수 있다. 일반적으로 승압형의 경우 박막액정 백라이트 구동용 전원장치 및 소형 음이온 발생기용으로 널리 적용되고 있다. 고전압 저전류 출력의 승압형 압전 변압기의 경우 Rosen 형[1] 길이 방향 진동 모드가 널리 사용되고 있다[2],[3][4]. 반면, 저전압 고전류 출력의 강압형의 경우 AC/DC adaptor에 적용 되며, 평판형, 장방형, 윤곽 진동형

등 여러 가지 모드가 제안되었다[2],[5][6]

이 논문에서는 윤곽진동형 압전변압기를 이용하여 강압형 DC/DC 컨버터 구동회로를 구현하였다. 이를 위해 실용화 가능한 저가형 타입의 클래스 E topology를 선정하여 최소한의 소자수로 압전 변압기 구동을 실현하였다[2],[7]-[12]. 또한 효율의 최적화를 위해서 주 스위치가 영전압 스위칭을 하도록 설계하였다. 본문에서는 이를 위한 동작 분석 [13]과 설계 기준 및 실험 결과를 제시하였다 또한 실험을 통해 이를 검증하였다. 응용으로서, 120 ~ 180 [V] 입력전압, 15 [V] / 1[A] 출력의 15W급 DC/DC 컨버터를 선정하였다.

2. 압전변압기의 구조 및 전기적 특성

그림 1은 윤곽 진동형 압전변압기의 구조를 나타낸다. 입력측은 고전압이며 높은 임피던스 특성을 가지는 입력조건을 만족시키기 위해 단층형태의 구조를 가지고 있으며 외곽의 출력측은 낮은 임피던스 특성을 가지며 저전압 고전류 조건을 만족시키기 위하여 다층으로 구성되어 일체화 되어 있다.

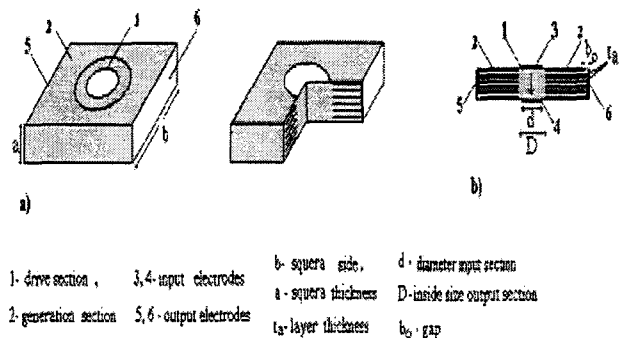


그림 1 윤곽 진동형 강압형 압전변압기 구조
 Fig. 1 Construction of a PT using contour-vibration mode

압전 변압기의 출력 부하 변동에 따른 전압 이득 특성은 그림 2와 같으며, bandpass 특성을 갖는다. 또한 부하 의존적이며, 주파수에 따라 다른 전압 이득값을 갖는다.

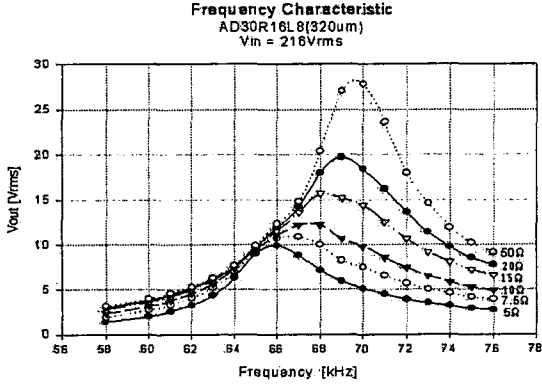
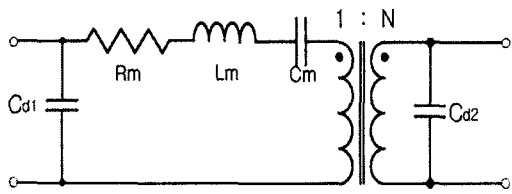


그림 2 압전 변압기의 전압 이득 특성
Fig. 2 Voltage gain characteristics of PT



$Cd1=910[\mu\text{F}]$, $Rm=63[\Omega]$, $Lm=79.1[\text{mH}]$, $Cm=72.9[\mu\text{F}]$, $Cd2=178[\text{nF}]$, $N=0.05$

그림 3 압전 변압기의 전기적 등가 회로 모델
Fig. 3 Electrical equivalent circuit of PT

압전 변압기의 전기적 등가 회로 모델은 그림 3과 같다. $N = 0.05$ 로써 이득의 최대치에 한계가 존재하기 때문에 벡 타입의 강압형 구동회로인 하프브리지 등의 구동회로 선정에 제약을 준다.

여기서 사용한 압전 변압기의 경우 크기는 $30 \times 30 \times 2.6 [\text{mm}^3]$, 전력 밀도는 $9[\text{W}/\text{cm}^3]$ 로써, 최대 $20[\text{W}]$ 까지 구동가능하다. 또한, 약 $69[\text{kHz}]$ 동작점 부근에서 약 $96\sim 97 [\%]$ 효율을 갖는다.

3. 인버터 회로 분석 및 동작

압전 변압기 구동을 위한 DC/DC 회로는 그림 4와 같다. 압전 변압기 구동을 위한 1차측 인버터 회로로 클래스 E 타입을 채용하였다. 이로써 인덕터 1개, 스위치 1개만을 사용하여 소자수를 최소화하여 압전 변압기 구동시 최저가 최소형의 회로 구현이 가능하게 된다. 또한, 회로의 크기 및 가격뿐 아니라 효율에도 유리한 영향을 준다. 앞에서 언급한대로 피에조의 이득에 한계가 있기 때문에 하프브리지 대신 풀브리지 회로를 써야 하는데, 이는 스위치의 개수가 너무 많아서 소용량의 전력변환

장치에는 부적절하다. 클래스 E 타입에서는 LC직렬 공진 네트워크가 필요한데, 이는 피에조 내부의 등가 LC 공진회로로 대체할 수 있다. 따라서 공진 소자수 또한 절감할 수 있는 장점이 있다. 압전 변압기 이차측의 정류회로의 경우 배류기(current doubler)를 사용하여 압전 변압기의 전류 부담을 줄였다.

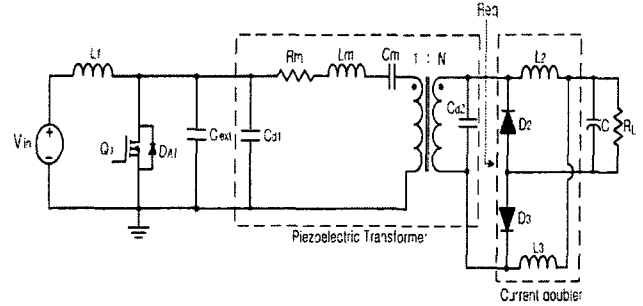


그림 4 클래스 E 를 적용한 DC/DC 컨버터 회로도
Fig. 4 DC/DC converter using class-E

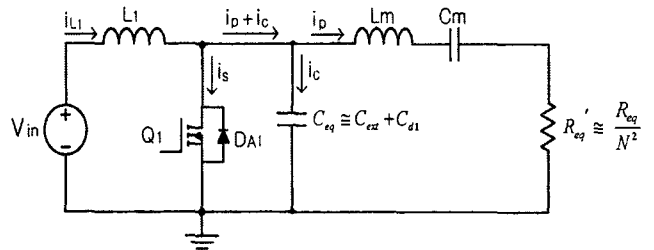


그림 5 단순화된 DC/DC 컨버터 회로도
Fig. 5 The simplified DC/DC converter

그림 4의 회로는 그림 5에 나타난 일반적인 클래스 E 회로로 변환가능하다. 우선, 배류기의 입력단에서 바라본 등가저항 Req 는 RL 의 $\pi^2/2$ 배에 해당한다.

$$R_{eq} = \frac{\pi^2}{2} \cdot R_L \quad (1)$$

또한, 압전 변압기 1차측에서 바라본 임피던스는 $N^2 C_d$ 와 Req/N^2 의 병렬값이 보이지만, 스위칭 주파수가 $69[\text{kHz}]$ 임을 감안하면, Req/N^2 성분만 보이게 되며, 이 값과 Rm 의 직렬 연결된 값이 Req' 을 결정한다.

$$N^2 C_d PVER \frac{R_{eq}}{N^2} \approx \frac{R_{eq}}{N^2} \quad (2)$$

$$Req' = R_m + \frac{Req}{N^2} \approx \frac{Req}{N^2} \quad (3)$$

그림 5에서 회로 동작은 간단하게 스위치 온 모드와

공진 모드의 두 가지로 나뉘지며, 공진 모드시에 변압기에 전력이 전달된다. 이때 압전 변압기의 bandpass 특성 때문에 공진 전압의 기본파 성분만 이차측으로 전달되고 하모닉 성분은 일차측에서 순환하게 된다. 여기서 공진 주파수 ω_0 는 다음과 같다.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_{eq}}} \quad (4)$$

$$L_1 \cdot \frac{di_{L1}(t)}{dt} = V_{in} - v_s(t) \quad (5)$$

$$C_{eq} \cdot \frac{dv_s(t)}{dt} = i_C(t) = i_{L1}(t) - i_P(t) \quad (6)$$

$i_P(t)$ 는 사인함수로 가정한다.

$$i_P(t) = I_m \sin(\omega_s t + \phi) \quad (7)$$

$$I_m = \frac{\pi I_o N}{2} \quad (8)$$

식 (7)에서 ω_s 는 스위칭 주파수를 나타내며, 식 (5), (6) 에서 $v_s(t)$ 를 유도하면 다음과 같다.

$$v_s(t) = K_1 \sin \phi \sin \omega_s t + V_{in}(1 - \cos \omega_s t) + K_2 \sin \omega_s t \quad (9)$$

$$K_1 = \frac{\pi L_1 \omega_s I_o N}{2(1 - \omega_s^2 \omega_0^2)}$$

$$\text{단, } K_2 = \frac{K_1(\omega_s C_{eq} \sin \phi - \cos \phi) + \frac{v_{in}}{L} DT}{\omega_s C_{eq}}$$

또한, 영전압 스위칭을 위해선

$$v_s(t = \frac{T_s}{2}) \leq 0 \quad (10)$$

한편, 입력 전압 변동에 따른 전력 제어는 피에조의 특성을 이용하여 주파수 제어를 하게 된다. 그림 2에 나타난 압전 변압기 이득 특성 곡선에서 기울기가 (-)인 최대 이득점의 오른쪽 주파수 영역에서 제어하게 되며, 스위치 오프 구간은 일정하게 유지한다.

4. Experimental results

설계 사양은 다음과 같다.

- 입력 전압 : DC 120 ~ 180 [V]
- 출력 전압 : DC 15 [V]
- 출력 부하 : 1 [A] ($R_L = 15[\Omega]$)

표 1 프로토타입 파라미터값 및 부품 목록

Table 1 Circuit parameter values and type of components of the prototype

Parameter	Value
L1	1 [mH] (EPC-19 core)
Cext	1.8 [nF]
Q1	IRF840 (500[V] / 3.5[A])
D2 , D3	MBRS1100(100[V] / 1[A])
L2 , L3	1 [mH] (EPC-17 core)
C	220 [uH]

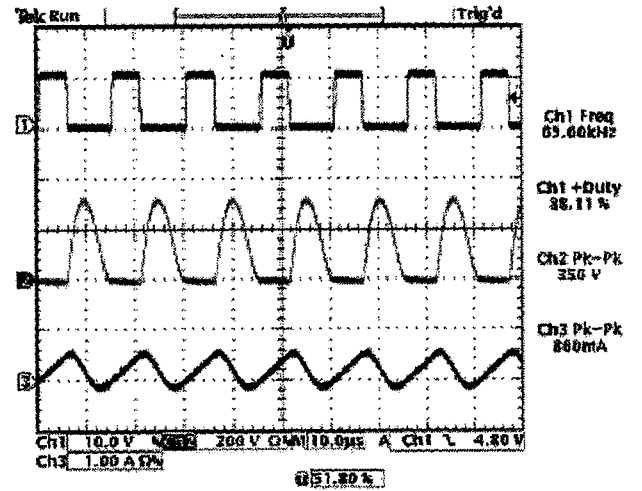


그림 6 측정된 결과 파형($V_{in} = 150[V]$) 위에서부터 주 스위치 게이트 신호(10[V/div]), 주 스위치 양단전압(200[V/div]), 입력측 인덕터 전류파형(1[A/div])

Fig 6 Measured waveform

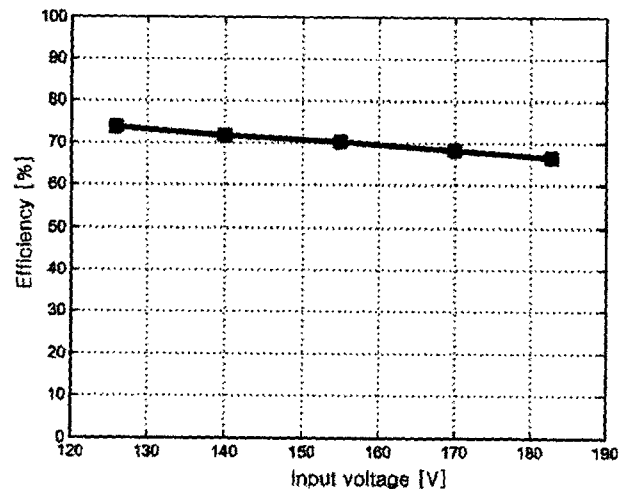


그림 7 입력전압에 따른 효율

Fig. 7 Efficiency according to input voltage

표 1은 실험에서 사용한 파라미터값과 부품 목록을 나타내며, 그림 6은 실험결과 파형을 나타내며, 주 스위치 전압의 영전압 스위칭을 확인할 수 있다. 그림 7은 입력 전압에 따른 효율 변화를 나타내며, 67 ~ 74 % 효율을 갖는다.

5. Conclusion

전력변환용으로 적합한 피에조 변압기를 이용한 DC/DC 컨버터를 구현하였다. 본 회로는 실용화를 염두하여 최소한의 소자로 구동할 수 있는 저가형 클래스 E 타입의 인버터를 선택하여 압전 변압기를 구동하였다. 또한 효율의 최적화를 위하여 주 스위치가 영전압 스위칭을 하도록 설계하였다. 이를 위한 설계 조건을 본문에서 제시하였고, 이를 실험을 통하여 확인하였다. 실험결과로 15W, 15V/1[A] 출력의 DC/DC 컨버터를 구동하여 67~74 %의 효율을 얻을 수 있었다. 앞으로 구동회로의 효율 최적화 및 최적 제어를 위한 연구가 진행될 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] C. A. Rosen, "Ceramic Transformers and Filters," Proc. Electronic Component Symp., pp. 205-211, 1956
- [2] Chih-yi Lin, and F. C. Lee, "Design and Analysis of Piezoelectric Transformer Converter", Virginia Tech. Ph.D paper, Jul., 1997
- [3] S. Kawashima, O. Ohnishi, H. Hakamata, S. Tagami. A. Fukuoka, "Third Order Longitudinal Mode Piezoelectric Ceramic Transformer and Its Application to High-Voltage Power Inverter", IEEE Ultrasonic Symposium, 1994, pp. 525-530
- [4] M. Shoyama, K. Horikoshi, T. Ninomiya, T. Zaitso, and Y. Sasaki, "Operation Analysis of the Push-Pull Piezoelectric Inverter", IEEE APEC and Exposition, Feb., 1997, pp. 573-578
- [5] T. Zaitso, Y. Fuda, Y. Okabe, T. Ninomiya, S. Hamamura, and M. Katsuno, "New Piezoelectric transformer converter for AC-adaptor", IEEE APEC, 1997, pp. 568-572
- [6] S. Hamamura, D. Kurose, T. Ninomiya, and M. Yamamoto, "New Control Method of Piezoelectric Transformer Converter by PWM and PFM for Wide Range of Input Voltage", IEEE , 2000
- [7] M. J. Prieto, J. Diaz, J. A. Martin, and F. Nuno, "A very Simple DC/DC Converter Using Piezoelectric Transformer", IEEE 2001
- [8] C. Y. Lin and F. C. Lee, "Design of Piezoelectric Transformer Converters using Single-ended topology", VPEC Power Electronics Seminar, Proc., 1994
- [9] T. Zaitso, T. Shigehisa, T. Inoue, M. Shoyama, and T. Ninomiya, "Piezoelectric Transformer Converter with Frequency Control", Proceedings of INTELEC'95, pp. 175-180, 1995
- [10] T. Zaitso, T. Shigehisa, T. Inoue, M. Shoyama, and T. Ninomiya, "Piezoelectric Transformer Converter with PWM Control", IEEE APEC, 1996, pp. 279-283
- [11] C. Y. Lin and F. C. Lee, "Design of a Piezoelectric Transformer Converter and its Matching Networks", PESC Record, 1994, pp. 607-612
- [12] S. Hamamura, T. Ninomiya, M. Yamamoto, and M. Katsuno, "Combined PWM and PFM Control for Universal Line Voltage of a Piezoelectric Transformer Off-Line Converter", IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 38, No. 1 , Jan 2003.
- [13] M. K. Kazimierczuk, and D. Czarkowski, Resonant Power Converters, John Wiley & Sons, Inc., 1995