

개선된 효율을 가지는 양방향 Zeta-Flyback 컨버터

정문규¹ · 권영안[†]

(원고접수일 : 2012년 5월 23일, 원고수정일 : 2012년 7월 6일, 심사완료일 : 2012년 8월 1일)

Bidirectional Zeta-Flyback Converter for Improved Efficiency

Munkyu Jung¹ · Young Ahn Kwon[†]

요약 : 양방향 컨버터는 신재생에너지를 이용하는 전력시스템, 무정전 전원 공급장치, 전기차 등 여러 분야에서 사용되며, 양방향 절연 컨버터는 양방향 비절연 컨버터보다 높은 신뢰성을 갖지만 효율이 낮은 단점이 있다. 본 논문에서는 개선된 효율을 가지는 절연된 양방향 Zeta-Flyback 컨버터를 제안한다. 이 컨버터는 양방향 Flyback 컨버터와 양방향 Zeta 컨버터의 중첩으로서 순방향 동작과 역방향 동작에서 전력 흐름이 변압기와 소자를 통해 수행되어 변압기 이용률이 증가하고, 출력 전압은 스위치의 일정 주파수 PWM의 듀티비에 의해 제어된다. 제안된 양방향 Zeta-Flyback 컨버터와 양방향 Flyback 컨버터를 비교하면 제안된 양방향 Zeta-Flyback 컨버터가 더 높은 효율을 갖으며 이를 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다.

주제어 : 양방향 Zeta-Flyback 컨버터, Pulse Width Modulation, 효율, 이용률

Abstract: In this paper, a bidirectional Zeta-Flyback converter is proposed. The topology of the proposed converter is analyzed, which is superposition of bidirectional Flyback converter mode and bidirectional Zeta converter mode in a cycle. The proposed converter allows power flow in either a forward direction or a backward direction. Bidirectional power flow is obtained by a transformer and components. The proposed converter's output is controlled by duty of constant frequency PWM of switch. Compared to conventional bidirectional isolated DC-DC converters, the proposed isolated bidirectional DC-DC converter has high power density and high transformer utilization. To confirm the proposed converter, the simulation and experimental results are presented.

Key words: Bidirectional Zeta-Flyback converter, Pulse Width Modulation, efficiency, utilization

1. 서 론

최근 화석연료의 고갈과 환경오염은 큰 문제로 고조되어 대체 마련을 위해 선진국을 중심으로 산업에서 엄격한 규정을 정하고 있으며 근본적인 해결을 위해 대체 에너지에 대한 연구가 원활히 진행되고 있다.

대체 에너지로는 신·재생 에너지가 있고, 이를 이용하는 전력시스템에서 양방향 컨버터의 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 예컨대, 연료 전지를 이

용하는 발전 시스템은 전지에서 발생된 직류를 교류로 변환하는 전력변환장치와 이것과 병렬로 연결된 양방향 DC-DC 컨버터를 통해 배터리를 충·방전하는 장치로 구성되어 있다[2-4].

전력시스템에서 배터리는 입력에서 부하로 공급되고 남은 전력을 배터리에 저장하여 에너지의 절약을 함과 동시에 신·재생 에너지의 전지로부터 발생하는 불안정한 전력을 부하로 안정되게 공급한다. 또한, 순간적인 최대 부하에서 배터리를 통

[†] 교신저자(부산대학교 전기공학과 E-mail:yakwon@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2372)

¹ 부산대학교 전자전기공학과, E-mail:munkyu99@naver.com, Tel: 051-510-3086

한 안정된 전력을 공급 할 수 있으므로 전지의 최대용량, 크기, 비용을 감소할 수 있다. 다른 여러 분야에서도 양방향 DC-DC 컨버터가 응용되고 있는데 무정전 전원 공급장치, 전기차가 있다[5,6].

이에 따라 양방향 DC - DC 컨버터에 대한 단순화, 소형화, 안정화, 효율성 향상에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[7,8].

기존의 양방향 DC-DC 컨버터는 절연된 양방향 DC-DC 컨버터[9,10]와 비절연된 양방향 DC-DC 컨버터[11,12]로 크게 분류 할 수 있다.

절연된 양방향 DC-DC 컨버터는 비절연 양방향 DC-DC 컨버터와 비교해 변압기를 통한 절연을 함으로써 더 높은 안정성으로 신뢰성은 높지만, 효율이 낮다는 문제가 있다.

본 논문에서 두 전원 사이에서 양방향 전력 흐름이 허용되는 양방향 Zeta-Flyback 컨버터를 제안한다. 제안된 양방향 Zeta-Flyback 컨버터는 입력측 스위치가 On상태인 경우에는 입력에서 공급되는 에너지가 변압기를 지나 양방향 Zeta 컨버터를 통해 출력으로 전력을 공급하고, 스위치가 Off 상태에서는 스위치가 On 상태일 때 변압기의 자화인덕턴스에 저장된 에너지가 양방향 Flyback 컨버터를 통하여 출력 측으로 전력을 공급한다. 따라서, 제안한 컨버터는 스위치의 한 주기 동안에 On/Off 각각의 상태에서 출력 측으로 에너지를 공급함으로써 양방향 Flyback 컨버터와 비교하여 변압기의 이용이 증가하고, 입·출력 효율이 증가한다. 입력 12V, 출력 30-60V, 스위칭 주파수 25kHz, 출력 100W의 제안된 양방향 Zeta-Flyback 컨버터의 회로를 분석하고 시뮬레이션 및 실험을 통하여 그 성능을 확인하였다.

2. 양방향 Zeta-Flyback 컨버터

2.1 제안된 양방향 Zeta-Flyback 컨버터

Figure 1은 본 논문에서 제안하는 양방향 Zeta-Flyback 컨버터의 회로도를 나타낸다.

제안된 양방향 Zeta-Flyback 컨버터는 순방향과 역방향으로 동작하는 토폴로지를 갖는다. 양방향으로 전환하여도 입출력의 극성은 비반전이다. 출력 전압은 입력측 스위치를 일정한 주파수 PWM의

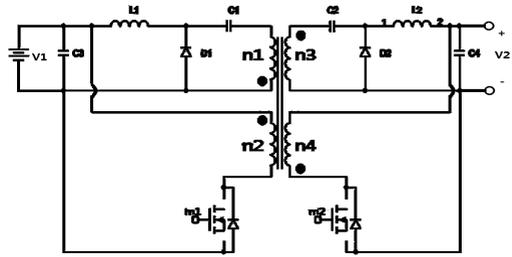


Figure 1: Proposed bidirectional Zeta-Flyback converter

듀티비를 조절하여 입력 전압보다 승압 또는 강압으로 제어 가능하고, 변압기의 권선비를 통해서도 출력 전압의 제어가 가능하다.

제안된 양방향 Zeta-Flyback 컨버터는 입력측 스위치가 Turn On 하게 되면, 입력에서 공급되는 에너지가 변압기를 지나 양방향 Zeta 컨버터를 통해 입력에서 공급하는 에너지가 출력으로 전달되고, Turn Off 시에는 On 시에 변압기 자화인덕턴스에 저장된 에너지가 양방향 Flyback 컨버터를 통해 출력으로 전달한다.

2.2 제안된 양방향 Zeta-Flyback 컨버터의 동작 분석

Figure 1의 제안된 양방향 Zeta-Flyback 컨버터의 회로에서 V_{GS} 는 스위치의 게이트-소스 양단간의 전압, V_{DS} 는 스위치의 드레인-소스 양단간 전압, D_1, D_2 는 양방향 Zeta 컨버터의 프리윙링 다이오드, L_1, L_2 는 양방향 Zeta 컨버터의 인덕터, C_1 과 C_2 는 양방향 Zeta 컨버터의 커패시턴스, m_1 과 m_2 는 스위치이다.

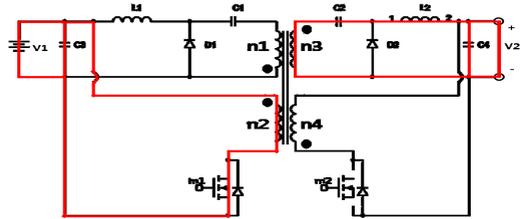
제안된 양방향 Zeta-Flyback 컨버터는 순방향 동작 상태와 역방향 동작 상태로 분석되고, Figure 2와 같이 제안된 양방향 Zeta-Flyback 컨버터는 스위치의 한 주기 동안에 On/Off에 의해서 순방향 동작 상태에서 2가지, 역방향 동작에서 2가지로 분석된다.

2.2.1 순방향 동작 상태 1 [$t_0 - t_1$]

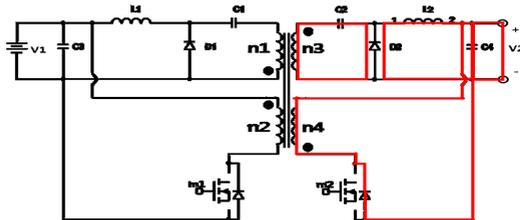
시간 t_0 에서 컨버터의 스위치 m_1 은 Turn On 되고, 시간 t_1 이전까지 스위치 On 상태를 유지한다. 이 동작 구간에서 변압기 2차측에 양방향 Zeta 컨

버터를 통해 출력전압 V_2 로 입력의 에너지를 전달한다. 권선비 n_2 인 변압기에서 입력측의 에너지가 공급되면서 축적되고, 커패시터 C_2 는 인덕터 L_2 로 에너지를 공급한다. 권선비 n_2 인 변압기의 자화인덕턴스와 인덕터 L_2 에 흐르는 전류는 증가하고 출력

커패시터 C_4 의 전압과 커패시터 C_2 의 전압은 출력 전압 V_2 와 같다. 위에서의 **Figure 2 (a)** 순방향 동작 상태 ($t_0 - t_1$)에서 등가회로로 나타낸다. 등가회로와 같이 변압기 1차측의 권선비 n_2 인 에너지가 2차측의 n_3 변압기로 전달되면서 다음 식으로 나타낼 수 있다.

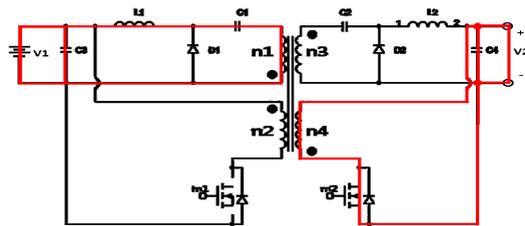


$[t_0 - t_1]$ (m_1 -On)

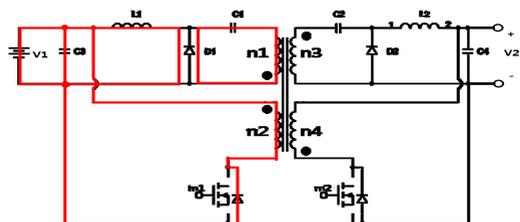


$[t_1 - t_2]$ (m_1 -Off)

(a) Forward operation state



$[t_0 - t_1]$ (m_2 -On)



$[t_1 - t_2]$ (m_2 -Off)

(b) Backward operation state

Figure 2: Proposed bidirectional Zeta-Flyback converter operation state

$$V_1 = \frac{n_2}{n_3} V_{SS} (n_1 : n_2 : n_3 : n_4 = 1 : 1 : 1 : 1) \quad (1)$$

$$V_{SS} + V_{C2} - V_{L2} - V_2 = 0 \quad (2)$$

커패시터 C_2 에 저장되어 있던 에너지는 인덕터 L_2 를 통하여 부하로 전달된다. 이때 다이오드 D_2 는 C_2 의 V_{C2} 에 의하여 역바이어스되므로 Off된다. 이때 인덕터 L_2 와 커패시터 C_2 에서 Vol-sec 평형조건을 적용하면 양방향 Zeta 컨버터의 전달비를 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{n_3}{n_2} V_1 + V_{C2} - V_2\right)DT = (1-D)TV_2 \quad (3)$$

$$V_{C2}(1-D)T = \frac{n_3}{n_2} V_1DT \quad (4)$$

$$\therefore \frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{n_3}{n_2}\right) \frac{D}{1-D} \quad (5)$$

2.2.2 순방향 동작 상태 2 [$t_1 - t_2$]

시간 t_1 에서 컨버터의 스위치 m_1 은 Turn-Off 되고, t_2 까지 스위치 Off 상태를 유지한다. 이 동작 구간은 변압기의 1차측 권선비 n_2 인 자화인덕턴스에 저장된 에너지를 2차측 Flyback 컨버터를 통해 부하로 에너지를 전달한다. **Figure 2 (a)** 순방향 동작 상태 ($t_1 - t_2$)에서 등가회로를 나타낸다. 양방향 Zeta 컨버터는 스위치 ON 기간 동안에 저장된 커패시터 C_2 과 인덕터 L_2 에너지는 프리휠링 다이오드 D_2 를 통해 환류하고, 스위치 On 구간동안에 변압기의 1차측 권선비 n_2 인 자화인덕턴스에 축적되었던 에너지를 자화 인덕터 평균전류 I_M 으로 2차측 권선비가 n_4 인 양방향 Flyback 컨버터의 변압기로 에너지가 전달되면서 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$E_{in} = E_{out} \quad (6)$$

입력과 출력 에너지 효율이 100%라고 가정하면 다음과 식과 같다.

$$E_{in} = V_1 I_M D T = E_{out} = \frac{n_2}{n_4} V_2 I_M (1-D) T \quad (7)$$

이 때, 스위치 m2의 body 다이오드가 도통되면서, 출력으로 에너지를 전달한다. t_2 에서 다시 스위치는 Turn On 되고 스위치의 한 주기는 끝나고, 순방향에서 동작 상태 1을 다시 반복한다. 이를 통해 양방향 Flyback 컨버터의 전달비를 구할 수 있다.

$$\therefore \frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{n_4}{n_2} \right) \frac{D}{1-D} \quad (8)$$

제안된 양방향 Zeta-Flyback 컨버터는 순방향 동작일 때, 식 (8)를 통하여 권선비와 듀티의 조절에 의해 강압과 승압이 가능하다는 것을 식으로 확인할 수 있다.

역방향 동작에서 역시 순방향 동작과 같은 방법으로 전달비를 구할 수 있고, 이를 통해 양방향 Zeta 컨버터와 양방향 Flyback 컨버터에 의해 강압과 승압이 가능하도록 병렬 연결하였다.

3. 시뮬레이션

Table 1은 양방향 Zeta-Flyback 컨버터의 시뮬레이션을 위한 파라미터를 나타낸다.

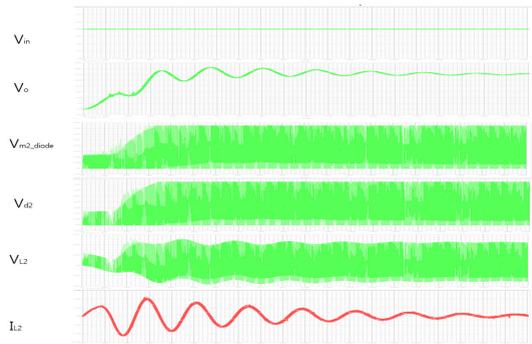
Table 1: Parameter of bidirectional Zeta-flyback converter

Parameter	Variable	Value
Input voltage	Vin	12V
Output voltage	Vout	30-60V
frequency	f	25Khz
Turn ratio	n	1:1:1:1
capacitance	Cout	220uF
inductance	Lout	2mH

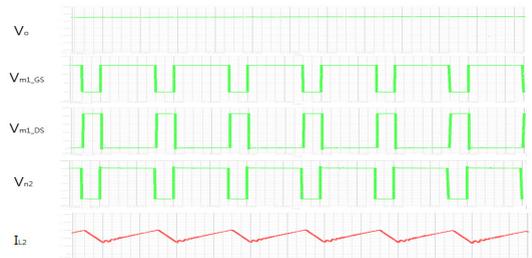
본 논문에서 제안된 시스템은 Orcad 10.3의 Pspice를 통하여 시뮬레이션 하였고, 스위칭 주파수는 25Khz이다. 부하는 저항 부하를 사용하였다.

Figure 3은 제안된 전체 시스템의 시뮬레이션 결과를 나타내고, 양방향 컨버터의 순방향과 역방향

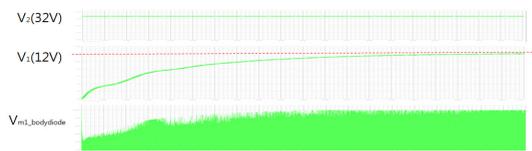
의 과도 상태와 안정 상태에서 각부의 파형을 보여준다. **Figure 3 (a)**는 순방향 운전에서 과도 상태를 시뮬레이션 한 것으로 입력 전압(V_{in})이 12V일 때, 출력 전압(V_o)이 0V에서 32V로 상승하는 파형을 보여준다. 주 스위치(m_1)를 기준으로 프리휠링 다이오드의 전압(V_{d2}), 인덕터 L_2 의 전압(V_{L2})의 파형을 나타낸다. **Figure 3 (b)**는 순방향 안정 상태에서 각 부의 시뮬레이션 파형을 나타낸다. 주 스위치



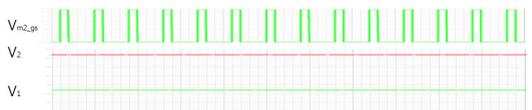
(a) Forward transient state



(b) Forward stable state



(c) Backward transient state



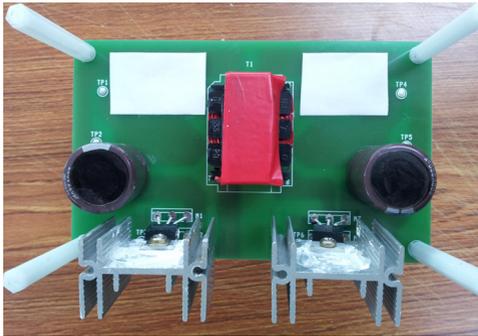
(d) Backward stable state

Figure 3: Proposed bidirectional Zeta-Flyback converter simulation waveform

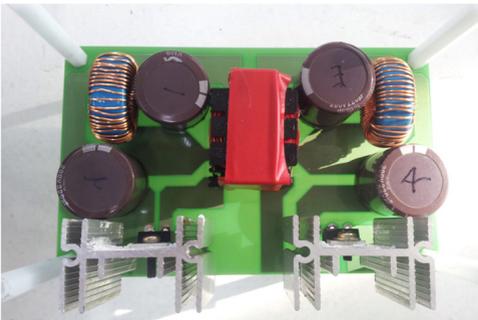
(m_1)의 게이트 전압(V_{m1_GS})과 드레인-소스 전압(V_{m1_DS}), 인덕터 L_2 의 전류(I_{L2})를 나타낸다. **Figure 3 (c)**에서는 역방향일 때, 과도 상태 입력 전압(V_2) 32V와 출력 전압(V_1) 12V의 파형을 나타내며, **Figure 3(d)**는 역방향 안정 상태에서 주 스위치(m_2)의 게이트 전압(V_{m2_gs}), 입력 전압(V_2)와 출력 전압(V_1)을 보여준다. 이를 통해 양방향으로 제어가 가능함을 확인하였다.

4. 실험결과

Figure 4의 실험 장치를 바탕으로 제안한 컨버터를 용량 100W급으로 MOSFET은 IRF1312PBF로 양방향 동작으로 실험하였다.



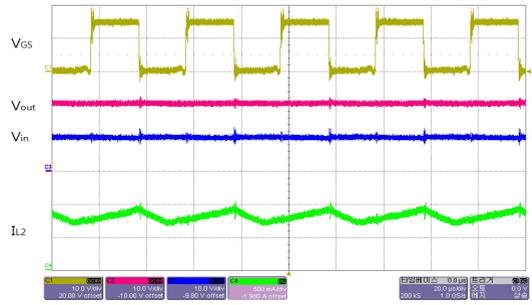
(a) Bidirectional Flyback converter



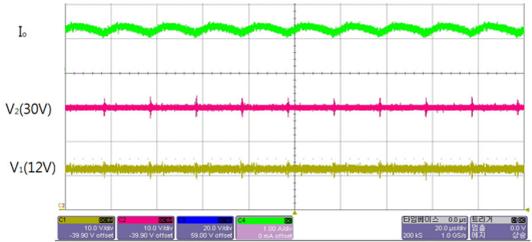
(b) Bidirectional Zeta-Flyback converter

Figure 4: Proposed bidirectional Zeta-Flyback converter

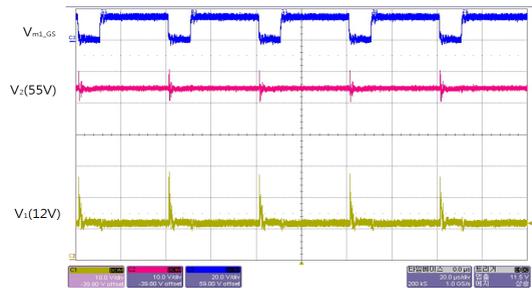
Figure 5는 양방향 Zeta-Flyback 컨버터의 순방향과 역방향 동작에서 스위치(m_1, m_2)의 전압, 인덕터 L_2 의 전류, 입력과 출력의 전압(V_1, V_2)을 측정된 실험 파형을 나타낸다.



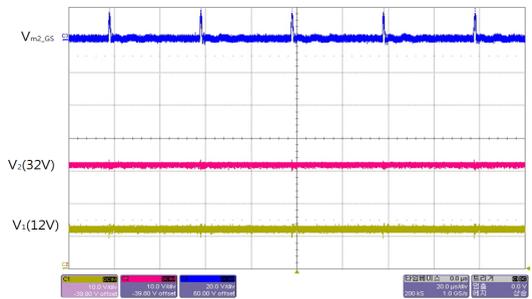
(a) Forward stable state (20W)



(b) Forward stable state (50W)



(c) Forward stable state (100W)



(d) Backward stable state

Figure 5: Proposed bidirectional Zeta-Flyback converter experiment waveform



Figure 6: Converter efficiency measurement

Figure 6은 동일한 출력 전압으로 동일한 부하에 일정한 입력전력을 공급할 경우, 출력전력에 따른 Zeta-Flyback 컨버터의 효율을 나타낸다.

5. 결론

본 논문에서 양방향 Zeta-Flyback 컨버터를 제안했다. 제안된 컨버터의 양방향 동작 상태 분석을 통하여 전달비는 $M = N \cdot D / (1-D)$ 임을 증명하였다. 전달비를 통해 변압기의 권선비과 듀티비 $D = T_{on} / T$ 에 의해 강압과 승압이 가능함을 확인하였고, 입력 전압 극성과 출력 전압 극성이 비반전임을 알 수 있었다. 또한, 각각의 동작 상태 분석을 통해 스위치 On과 Off 상태에서 양방향 Flyback 컨버터와 양방향 Zeta 컨버터의 중첩에 의해, 에너지를 부하로 효과적으로 전달할 수 있게 함으로써 변압기의 효율이 향상됨을 확인하였다. 제안된 양방향 Zeta-Flyback 컨버터는 하나의 스위치를 사용하며 동작이 가능하며, 입출력 효율이 향상됨을 확인할 수 있었다.

참고문헌

[1] M Y Chong, A A Rahman, N A Aziz, A Khamis, and M F M Basar, "Performance comparison of bidirectional converter designs for renewable power generation," PEOCO, pp.101-106, 2010.
 [2] W Liu, J Chen, T Liang, R Lin, and C Liu, "Analysis, design, and control of bidirectional cascaded configuration for a fuel cell hybrid

power system," IEEE Trans PE, vol. 25, no. 6, pp. 1565-1575, 2010.
 [3] Z Zhang, Z Ouyang, O C Thomsen, and M A E Andersen, "Analysis and design of a bidirectional isolated DC-DC converter for fuel cells and supercapacitors hybrid system," IEEE Trans PE, vol. 27, no. 2, pp. 848-859, 2012.
 [4] X Li, W Zhang, H Li, R Xie, and D Xu, "Design and control of bi-directional DC/DC converter for 30kW fuel cell power system," ICPE & ECCE, pp. 1024-1030, 2011
 [5] C Du, X Li, X Wu, W Zhang, and D Xu, Dehong, "Fuel cell UPS system without bulky DC electrolytic capacitors," PEDG, pp. 696-702, 2010.
 [6] X Zhang, H Guo and J Xie, "Multiple Input Bidirectional DC/DC Converter for Energy Supervision in Fuel Cell Electric Vehicles", ICECE, pp. 3890-3893, 2010.
 [7] R Wai, R Duan and K Jheng, "High-efficiency bidirectional dc-dc converter with high-voltage gain," IET PE, vol.5, no.2, pp. 173-184, 2012
 [8] R Duan and J Lee, "High-efficiency bidirectional DC-DC converter with coupled inductor," IET PE, vol. 5, no. 1, pp. 115-123, 2012.
 [9] L Eitzen, C Graf and J Maas, "Cascaded bidirectional flyback converter driving DEAP transducers," IEEE IECON, pp. 1226-1231, 2011.
 [10] E Souza and I Barbi, "Bidirectional Current-Fed Flyback-Push-Pull DC-DC Converter," COBEP, pp. 8-13, 2011.
 [11] A A Abounaga and A Emadi, "High performance bidirectional Cuk converter for telecommunication systems," INTELEC, 182-189, 2004
 [12] B Lin, and J Chen, "Analysis of an integrated flyback and zeta converter with active clamping technique," IET PE, vol. 2, no. 4, pp. 355-363, 2009.