

2차측 보조회로를 이용한 ZVZCS Three-Level 컨버터에 관한 연구

김동원* · 김 용* · 배진용** · 이은영*** .. 이규훈[§]
 *동국대학교 · **특허청 · ***대림대학교 · [§]스마트비전텍

A study on the ZVZCS(Zero-Voltage and Zero-Current-Switching) Three-Level converter using the secondary auxiliary circuit

Dong-Won Kim* · Yong Kim* · Jin-Yong Bae** · Eun-Young Lee*** · Kyu-Hun Lee[§]
 *Dongguk University · **KIPO · ***Daelim College · [§]Smart Vision Tech

Abstract - This paper presents the ZVZCS(Zero-Voltage and Zero-Current-Switching) Three-Level converter using the secondary coupled inductor and auxiliary capacitor. The converter with phase-shift control is proposed to reduce the circulating loss in primary and the voltage stress in secondary side. Using a coupled winding of the output inductor, two auxiliary capacitors are generated to reset the primary current at circulating interval.

변압기와 직렬로 인덕터를 삽입하는 방법이 사용된다^{[2][15]}
^[6]. 그러나 이러한 방법은 유효 듀티 사이클을 감소시키며, 누설인덕터에 축적된 에너지와 1차측으로 반영된 출력측 평활인덕터의 에너지가 환류하는 구간이 발생되어 컨버터의 도통손실이 증가하며, 고주파 변압기의 이용율이 낮아지는 단점을 지니게 된다. 또한, 기존의 ZVS Three-Level 컨버터는 특정 부하영역에서 ZVS 조건을 잃는다. 따라서 ZVS 동작을 할 수 있는 1차측 임계전류는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다^{[1-5][8-9]}.

1. 서 론

본 논문에서는 고전압 입력, 대전류 출력 분야에 응용할 수 있는 새로운 ZVZCS(Zero-Voltage and Zero-Current-Switching) Three-Level DC/DC 컨버터에 관하여 논하였다. 입력 전압의 승압화와 입력단 역률 개선 컨버터의 적용으로 기존의 풀브리지 컨버터는 스위칭 소자의 전압 정격 상승, 스위칭 손실의 증가 및 스위칭 주파수의 한계로 인해 고효율을 이루기 어려우며, 이러한 문제점의 해결을 위해 Three-Level 컨버터에 대한 연구가 진행중이다^[1-9]. 기존 방식의 컨버터는 높은 입력 전류가 변압기 1차측에 흐르는 경우에 환류손실이 커지는 문제점이 있다^[11-12]. 본 연구는 이러한 문제점을 해결하기 변압기 2차측에 결합인덕터를 이용한 영전압·영전류 스위칭(ZVZCS)을 제안하고자 한다. 본 논문에서는 제안된 컨버터의 동작원리, 해석 및 특성에 대해서 논하였으며, MOSFET를 사용하여 1.6[kW]급 시제품을 제작, 40 [kHz]에서 실험하였다.

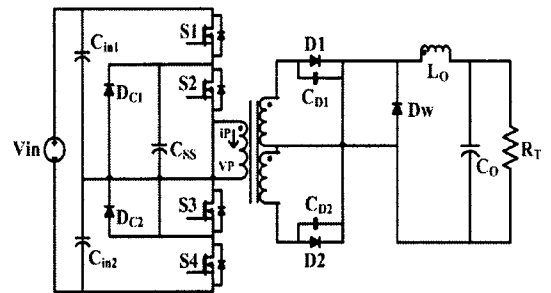


그림 1. 기존의 ZVS Three-Level 컨버터

$$i_{min} = \sqrt{-\frac{2}{L_k} \left\{ \frac{4}{3} C_{ms} \left(\frac{V_{in}}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} C_r \left(\frac{V_{in}}{2} \right)^2 \right\}} \quad (2)$$

결과적으로 ZVS 동작은 1차측에 반영된 부하전류(I_{out})가 임계 전류보다 클 때 이루어지게 되므로 ZVS 동작 조건은 식 (3)으로 된다^[8].

$$\frac{1}{n} i_{crit} > i_{out} \quad (3)$$

여기서, n₁ : 변압기 권선비 (N₁/N₂)

2. 본 론

2.1 기존의 Three-Level 컨버터

그림 1은 Three-Level DC/DC 컨버터 회로를 나타낸다. 주 스위치의 안정된 영전압 스위칭 동작을 위하여 고주파 변압기의 누설인덕터는 스위치 커패시터와 고주파 변압기의 기생 커패시터를 충·방전할 수 있도록 설계되어야 한다. 즉 누설인덕터에 저장된 에너지가 식(1)을 만족할 때 실제적인 ZVS 동작이 이루어진다^{[1-5][8]}.

$$\frac{1}{2} L_k I_k^2 > \frac{4}{3} C_{ms} \left(\frac{V_{in}}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} C_r \left(\frac{V_{in}}{2} \right)^2 \quad (1)$$

여기서, C_{mos} : 일반적인 스위치 커패시터
 C_r : 고주파 변압기의 권선간 커패시터 (기생 커패시터)

일반적으로 안정한 영전압 스위칭 동작 영역을 확보하기 위해 누설인덕턴스(L_k)를 증가시키거나 또는 고주파

2.2 제안된 Three-Level 컨버터

그림 2는 제안된 2차측 보조회로의 Three-Level 컨버터를 나타낸다. 다이오드 D₁, D₂가 2차측 정류다이오드들이고, 다이오드 D_{c1}, D_{c2}가 2차측 보조정류 다이오드들이며, 다이오드 D_{c3}는 정류 다이오드들의 전압을 클램핑하기 위하여 사용된다. 2차측 보조커패시터 C₁, C₂는 한 주기 동안 전압원으로 가정할 수 있으며, 커패시터 C_{D1}-C_{D2}는 다이오드 D₁, D₂의 기생 커패시터를 회로적으로 나타낸 것이다.

그림 2의 2차측 결합인덕터의 결합 권선수가 동리하게 설계하였기 때문에 결합인덕터 양단의 전압은 동일하며, 식(4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_o = (V_{C1} + V_{C2}) \quad V_o/2 = (V_{C1} - V_{C2}) \quad (4)$$

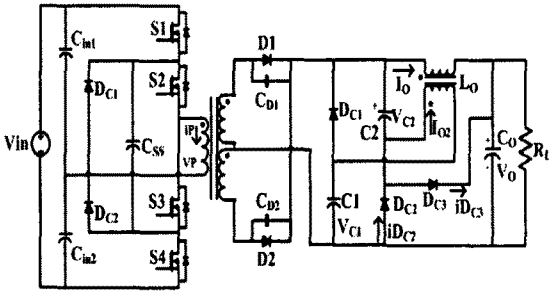


그림 2. 제안된 Three-Level 컨버터

2.3 제안하는 컨버터의 동작원리

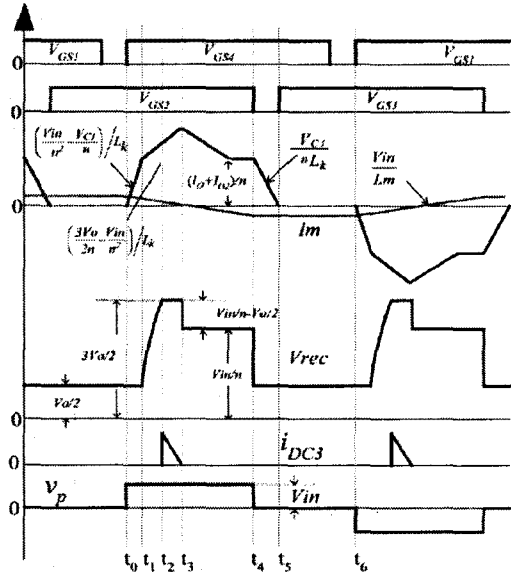


그림 3. 제안된 회로의 이론적인 각부 파형

그림 3은 한 주기 동안 이론적인 각부 파형을 나타낸다. 출력 전류 I_{O2} 가 한 주기 동안 일정하고, 이때의 출력 전압은 V_o 라 할 수 있다.

1) 모드 I : $t_0 \leq t \leq t_1$

시간 t_0 에서 스위치 S_1, S_2 가 턴 오프되며, 입력전력은 변압기를 거쳐 정류다이오드 D_1, D_2 와 보조다이오드 C_{D1}, C_{D2} 에 의해서 2차측으로 전달된다. 변압기 1차측 전류(i_p)는 정류다이오드 D_1, D_2 가 턴 온되면 증가하기 시작하고, $(I_0 + I_{O2})/n$ 까지 증가한다. 이 때 정류 다이오드 D_2, D_3 에 걸린 전압은 $V_o/2$ 로 클램핑되며, 이 모드에서 변압기 1차측 전류에 대한 기울기는 식(5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{di_p}{dt} = \left(\frac{V_{in}}{n^2} - \frac{V_{Cl}}{n} \right) / L_k \quad (5)$$

2) 모드 II : $t_1 \leq t \leq t_2$

시간 t_1 에서 보조다이오드 D_{C1}, D_{C2} 이 턴 오프되면, 변압기 2차측 누설인덕턴스 L_k 는 정류 다이오드의 기생커패시터인 C_{D1}, C_{D2} 와 공진이 일어난다. 공진 전압 $V_C(t)$ 는 기생 커패시터 인가되는 걸리는 전압이며, 2차측 정류다이오드에 인가되는 전압은 $(V_o + V_{Cl}) = 3V_o/2$ 까지 증가하게 된다. 이 모드에서 변압기 2차측 전류와 2차측 정류다이오드의 전압 및 변압기 1차측 전압은 식

(6)-(8)로 나타낼 수 있다.

$$i_{Lk}(t) = I_0 + I_{O2} + \frac{V_{in}/n - V_{Cl}}{Z_r} \cdot \sin \omega_r (t - t_1) \quad (6)$$

$$V_C(t) = \frac{V_{in}}{n} \cdot (1 - \cos \omega_r (t - t_1)) + V_{Cl} \cdot \cos \omega_r (t - t_1) \quad (7)$$

$$i_p(t) = i_{Lk}(t)/n \quad (8)$$

$$Z_r = \sqrt{L_k/C} \quad , \quad C = C_{D1} + C_{D2}$$

3) 모드 III : $t_2 \leq t \leq t_3$

2차측 정류다이오드에 인가되는 전압 V_{rec} 가 $3V_o/2$ 에 도달했을 때, 2차측 보조다이오드인 D_{C3} 는 도통하기 시작하고, 입력측 전압 V_{in}/n 이 $3V_o/2$ 보다 작기 때문에, 2차측 누설인덕터 L_k 의 전류는 t_2 에서 감소하기 시작한다. 이 모드에서 변압기 1차측 전류에 대한 기울기는 식(9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{di_p}{dt} = \left(-\frac{3V_o}{2n} - \frac{V_{in}}{n^2} \right) / L_k \quad (9)$$

4) 모드 IV : $t_3 \leq t \leq t_4$

보조 다이오드 D_{C3} 가 시간 t_3 에서 턴 오프 되면, 변압기 2차측 다이오드 전압 V_{rec} 는 V_{in}/n 가 되고, 이 기간 동안 전류 I_{O2} 는 2차측 보조 커패시터 C_1, C_2 를 충전시키고, 보조 커패시터의 전압 V_{C1}, V_{C2} 은 동일하게 된다.

5) 모드 V : $t_4 \leq t \leq t_5$

시간 t_4 에서 스위치 S_4 가 턴 오프 되며, 스위치 S_3 및 S_4 의 기생 커패시터는 부하전류에 의해서 충전된다. 스위치 S_4 에 인가되는 전압이 V_{in} 에 도달하면, 스위치 S_3 의 바디다이오드를 통하여 환류전류가 흐르게 된다. 스위치 S_3 의 바디다이오드가 도통하면, 변압기 1차측 전압은 "0"으로 클램핑되며, 2차측 보조다이오드 D_{C1}, D_{C2} 는 도통하게 된다. 이 때 2차측 보조다이오드 전압 V_{C1}, V_{C2} 는 변압기의 누설 인덕터 L_k 와 공진하게 되어 변압기 1차측 전류 i_p 는 감소하게 된다. 이 모드에서 변압기 1차측 전류에 대한 기울기는 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{V_{Cl}}{n} \cdot \frac{1}{L_k} \quad (10)$$

6) 모드 VI : $t_5 \leq t \leq t_6$

시간 t_5 이후에 2차측 정류다이오드에 인가된 전압은 V_{Cl} 으로 클램핑되고, 출력인덕터 L_o 양단의 전압은 $(V_o - V_{Cl})$ 로 된다. t_6 에서 스위치 S_1 동작되면서 이 모드는 끝나게 된다.

7) 모드 VII : $t > t_6$

시간 t_6 이후에는 나머지 반주기는 상기의 과정과 동일하게 된다.

2.4 실험결과

제안된 방식의 타당성을 검증하기 위하여 40kHz, 1.6kW 급 위상이동 방식의 Three-Level 컨버터를 제작하여 실험하였다. 표1은 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터 값을 나타낸다. 그림 4는 제안된 ZVZCS Three Level 컨버터에 대해 각각의 1차측 변압기 전압 (V_{ab}) 및 전류(I_p) 파형을 나타낸다.

표1. ZVZCS Three Level 컨버터의 정격 및 파라미터

입력전압	400[V]
출력전압	40[V]
최대출력	1.6[kW]
주 변압기	EC 90. TDK 13 : 4, $L_{lk} = 2.933[\mu\text{H}]$
입력단 커패시터	2820[μF]
Flying 커패시터	100[μF]
주 스위치	IXYS26N50Q
2차측 다이오드	DEXI 2X121-02A. IXYS
2차측 보조 커패시터	20[μF]
2차측 출력 인덕터	1 : 1 100.24[μH]
출력단 커패시터	33600[μF]
스위칭 주파수	40[kHz]

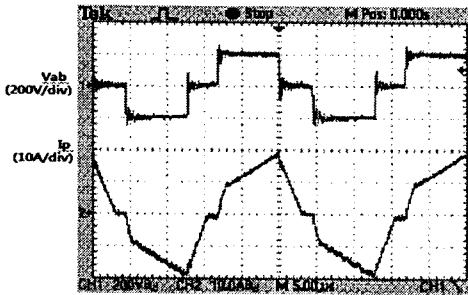


그림 4. 제안된 ZVZCS Three-Level 컨버터의 변압기 전압 및 전류 파형

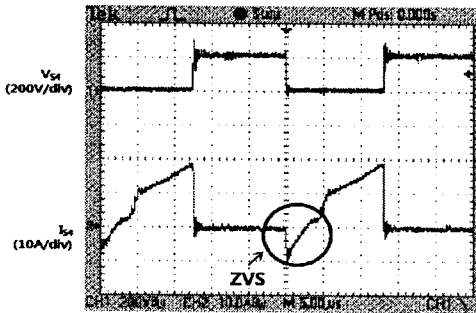


그림 5. 스위치 S4의 영전압 스위칭 파형

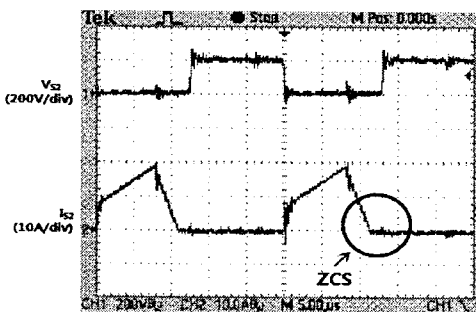


그림 6. 스위치 S2의 영전류 스위칭 파형

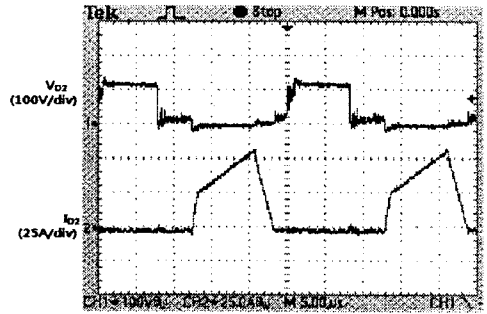


그림 7. 정류다이오드 전압 및 전류 파형

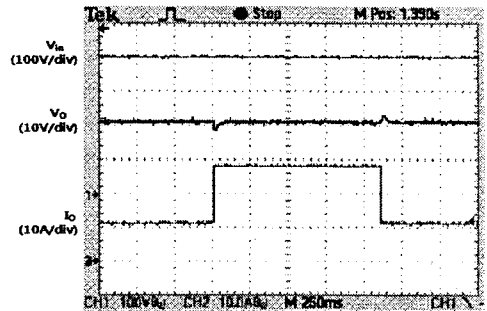


그림 8. 부하 변환 출력 전압 및 전류 파형

그림 5는 스위치 S4의 영전압 스위칭(ZVS)파형을 나타내며, 그림 6는 스위치 S2의 영전류 스위칭(ZCS)파형을 나타낸다. 또한 그림 9는 제작된 컨버터의 효율을 나타내며, 본 연구에서 제안한 Three Level 컨버터는 고전압·대전력에서 비교적 우수한 효율을 지니고 있음을 알 수 있다.

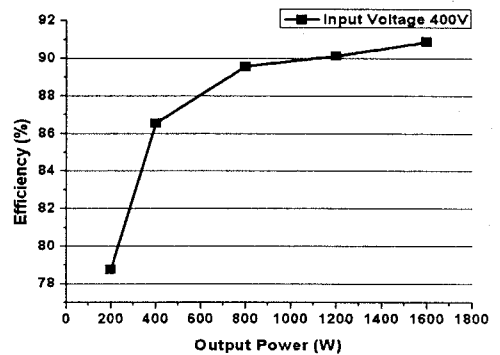


그림 9. 제안된 ZVZCS Three-Level 컨버터의 효율

3. 결론

본 논문에서는 2차측 결합인덕터를 이용한 ZVZCS Three Level DC/DC 컨버터를 제안하였다. 1차측은 Three Level 결선을 하고 여기에 위상이동 스위칭 방법을 적용하며 플라잉 커패시터(C_{SS})에 의하여 스위치 S1과 S4를 영전압 스위칭 한다. 또한, 2차측에는 결합인덕터를 이용한 보조회로를 추가함으로써, 스위치 S2와 S3

의 영전류 스위칭이 가능하도록 하였으며, 도통손실이 현저히 저감됨을 확인할 수 있었다. 제안한 컨버터는 기존의 Three Level 컨버터 비하여 스위칭 손실이 적으며 또한 보조 회로에 손실성 소자나 능동 스위칭 소자를 필요로 하지 않으므로 제작이 편리하고 비교적 높은 효율을 얻을 수 있으므로 고전압·대전력 응용분야에 적합하리라 생각된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 배진용, 김용, 권순도, 김필수, 이은영, "2차측 보조회로를 이용한 ZVZCS Three Level DC/DC 컨버터에 관한 연구," 대한전기학회 EMECS 춘계학술대회논문집, pp.320-323, 2001.
- [2] 배진용, 김용, 백수현, 김필수, 권순도, "2차측 결합인덕터를 이용한 ZVZCS Three Level DC/DC 컨버터에 관한 연구," 전기학회 논문지, 51권 5호, pp. 258-265, 2002.
- [3] 김은수, "영전압·영전류 스위칭 3 레벨 DC/DC 컨버터," 전기학회 논문지, 51권 12호, pp. 682-6905, 2002.
- [4] Francisco Canales, Peter M. Barbosa, and Fred C. Lee, "A Zero Voltage and Zero Current Switching Three Level DC/DC Converter," The Proceedings of The APEC'2000, Vol. 1, pp. 314-315, February 2000.
- [5] Francisco Canales, Peter M. Barbosa, and Fred C. Lee, "A Zero Voltage and Zero Current Switching Three Level DC/DC Converter," IEEE Transactions on, Power Electronics, Vol. 17, pp. 898-904, November 2002.
- [6] 배진용, 김용, 권순도, 김필수, 이규훈, "1차측 결합 인덕터를 이용한 ZVZCS Three-Level DC/DC 컨버터에 관한 연구," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1176-1180, KIEE 2004 하계학술대회, 2004.
- [7] S. J. Jone. F. Canales, P. M. Barbosa and F. C. Lee, "A Primary-Side-Assisted Zero-Voltage and Zero-Current Switching Three-Level DC-DC Converter with Phase-Shift Control," The Proceedings of The APEC'2002, pp. 641-647, March 2002.
- [8] 배진용, 김용, "Three Level 컨버터의 손실 분석에 관한 연구," 전기학회 논문지 52권 10호, pp. 514-512, 2003.
- [9] F. Canales, J. M. Burdio, and Fred C. Lee, "A zero voltage switching three-level DC/DC converter," Telecommunications Energy Conference, pp. 512-517, 2000.
- [10]H. Loveday-Weene and A. Chris-Wright, "A 1kW, 500kHz front-end converter for a distributed power supply system", in proc. IEEE APEC'89, 1989, pp. 423-432.
- [11]J.-G. Cho, J.-W. Baek, C.-Y. Jeong, and G.-H. Rim, "Novel zero-voltage and zero current switching full-bridge pwm converter using a simple auxiliary circuit", IEEE trans. Ind. Appl., vol. 35, no. 1, pp. 15-20, Jan./Feb. 1999.
- [12]E.-S. Kim, K.-Y. Joe, M.-H. Kim, and B.-D. Yoon, "An improved soft switching PWM FB dc-dc converter for reducing conduction loss", IEEE trans Power Electron., vol 14, no. 2, pp. 258-264, Mar. 1999.