

최소 보조회로를 이용한 ZVS/ ZVZCS Three-Level 컨버터에 관한 연구

조규만* . 김 용** . 배진용*** . 이은영§ . 최근수§§

*한국폴리텍IV청주대학 . **동국대학교 . ***특허청 . §대림대학 . §§디지아이

A study on the ZVS/ ZVZCS Three-Level converter using the minimum auxiliary circuit

Kyu-Man Cho* . Yong Kim** . Jin-Yong Bae*** . Eun-Young Lee§ . Geun-Soo Choi§§

*Korea Polytechnic College IV . **Dongguk University . ***Korean Intellectual Property Office . §Daelim College . §§DGI

Abstract - This paper discusses the ZVS/ ZVZCS Three-Level converter using the minimum auxiliary circuit. A primary auxiliary circuit, which consists of one coupled inductor is added in the primary circuit to provide ZVZCS conditions to primary switches. ZVS is for outer switches and ZCS or ZVS is for inner switches. Many advantages including simple circuit topology high efficiency, and low cost make this converter attractive for high power applications. The principle of operation, feature and design considerations are illustrated and verified through the experiment with a 2 μ 40kHz IGBT based experimental circuit.

1. 서 론

본 논문에서는 기존의 ZVS Three-Level 컨버터의 1차측 환류 다이오드(D_{c1}, D_{c2})를 제거하여 최소 소자로 구성된 보조회로에 의해 영전압 스위칭이 가능한 방식과 기존의 ZVS Three-Level 컨버터에 하나의 결합인덕터를 사용하여 영전압·영전류 스위칭이 가능한 방식을 제안하고자 한다.

본 실험에서는 제안된 방식의 타당성을 검증하기 위하여 IGBT를 사용하여 2kW급 시제품 제작, 40kHz에서 실험하였다.

2. 본 론

2.1 일반적인 ZVS Three-Level 컨버터

그림 1은 일반적인 ZVS Three-Level 컨버터 회로를 나타낸다. 일반적인 ZVS Three-Level 컨버터는 1차측 환류 다이오드(D_{c1}, D_{c2})를 이용하여 순환전류의 환류 경로를 형성하게 되므로 누설 인덕턴스(L_{lk})에 저장된 에너지를 환류시켜서 스위치 1, 4가 영전압 턴온 스위칭 동작을 가능한 장점이 있지만, 스위치 2, 3이 턴오프시 하드스위칭 하며, 환류구간에서 전도 손실이 발생하는 단점을 지니고 있다[1].

2.2 제안된 ZVS Three-Level 컨버터

따라서 그림 2는 기존의 단점을 극복한 최소 보조회로로 구성된 ZVS Three-Level 컨버터 회로를 나타낸다.

제안된 ZVS Three-Level 컨버터는 1차측 환류 다이오드(D_{c1}, D_{c2})를 제거함과 동시에 스위치 1, 4가 영전압 턴온 스위칭을 하면서 동시에 스위치 2, 3이 영전압 턴오프 스위칭이 가능하다.

그림 3과 그림 4는 제안된 ZVS Three-Level 컨버터의 모드별 동작 파형과 동작 회로를 나타낸다. 제안된 회로는 반주기에 6개의 모드를 지니고 있으며, 거의 50%

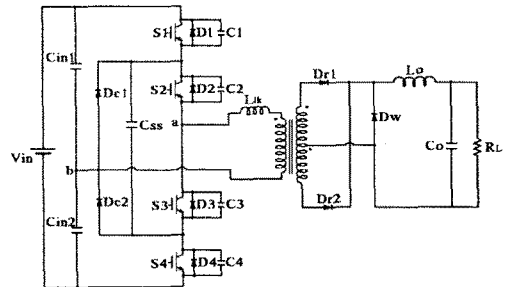


그림 1. 일반적인 ZVS Three-Level 컨버터 회로

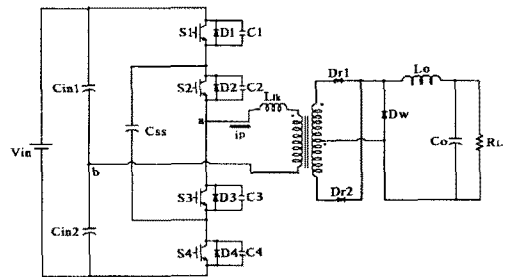


그림 2. 제안된 ZVS Three-Level 컨버터 회로

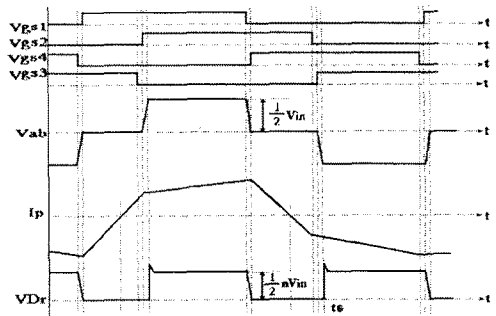
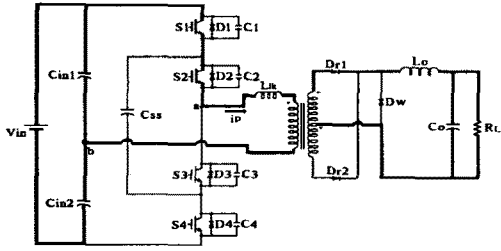


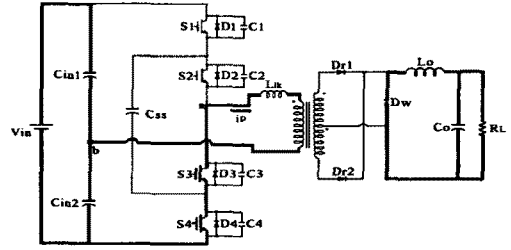
그림 3 제안된 ZVS TL 컨버터의 이론적인 각부 파형

의 듀티 주기마다 위상 이동방식의 스위칭 형태로 동작한다. 위상이동은 스위치 S1과 S2, S3와 S4사이에서 일어난다.

1) 모드 I : $t_0 \leq t \leq t_1$
스위치 S1과 S2이 턴온되어 있고 전력이 출력측으로 전달되며 변압기 1차측으로 전류가 흐른다.

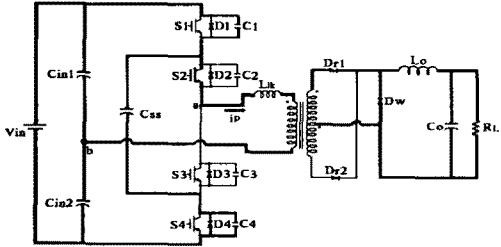


MODE I ($t_0 \sim t_1$)

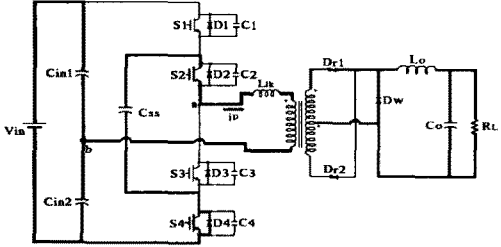


MODE VI ($t_5 \sim t_6$)

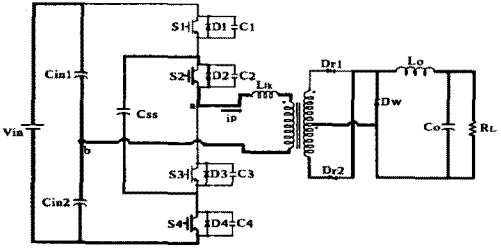
그림 4. 제안된 ZVS TL 컨버터의 모드별 동작



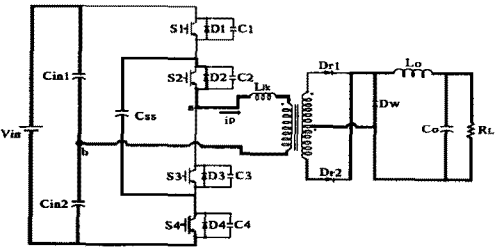
MODE II ($t_1 \sim t_2$)



MODE III ($t_2 \sim t_3$)



MODE IV ($t_3 \sim t_4$)



MODE V ($t_4 \sim t_5$)

또한, 변압기 1차측 전압 $V_{ab}(t)$ 와 전류 $I_p(t)$ 는 식(1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{ab}(t) = \frac{1}{2} V_{in} \quad (1)$$

$$I_p(t) = I(t_0) + \frac{(V_{in}/2) - V_o}{L_{lk} + n_1 L_o} t \quad (2)$$

2) 모드 II : $t_1 \leq t \leq t_2$

모드 I에서 스위치 S1이 턴오프되면 변압기 1차측에 흐르는 전류는 변압기의 1차측 누설 인덕턴스(L_{lk})에 의하여 계속적인 흐름을 유지하려 한다.

S2가 도통 상태이고 전류 경로상 스위치 S4의 내장 다이오드 (D_4)가 도통하여 스위치 S4는 영전압 스위칭이 된다. 스위치 S1과 S4의 전압은 식(3),(4)와 같이 나타낼 수 있다.

또한, 변압기 1차측 전압 $V_{ab}(t)$ 는 식(5)와 같이 나타낼 수 있고, 전류 $I_p(t)$ 는 모드 I의 전류식과 동일하게 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{S1}(t) = (V_{in}/2 - n_1 V_o)(1 - \cos \omega_o(t - t_1)) + I_1(t_1) Z_o \sin \omega_o(t - t_1) \quad (3)$$

$$V_{S4}(t) = \frac{V_{in}}{2} - \frac{C_{ss}}{C + C_{ss}} V_{S1}(t) \quad (4)$$

여기서,

n_1 : 주 변압기의 권선비 (N_1/N_2)

ω_o : 모드 II에서 공진 주파수, $\omega_o = \sqrt{\frac{1}{L_{eq} C_{eq}}}$

Z_o : 모드 II에서 임피던스, $Z_o = \sqrt{\frac{L_{eq}}{C_{eq}}}$

$$L_{eq} = L_{lk} + n_1^2 L_o$$

$$C_{eq} = \left(C + \frac{C \times C_{ss}}{C + C_{ss}} \right)$$

$$C = C_1 = C_2$$

$$V_{ab}(t) = \frac{I_o}{n_1(C_1 + C_4)} t \quad (5)$$

$$I_p(t) = I(t_0) + \frac{(V_{in}/2) - V_o}{L_{lk} + n_1 L_o} t \quad (6)$$

3) 모드 III : $t_2 \leq t \leq t_3$

스위치 S4가 영전압 스위칭 조건에서 턴오프되고 S2도 턴오프되어 있어 변압기의 1차측 누설 인덕턴스(L_{lk})에 의하여 계속적인 흐름을 유지되면서 점차 감소하여 영이 되는 구간이며 1차측에서 2차측으로 전달되는 전력이 감소하므로, 2차측 출력 인덕터(L_o)의 에너지는 환류 다이오드(D_w)를 통하여 출력측으로 전달된다. 변압기 1차 전압 $V_{ab}(t)$ 와 전류 $I_p(t)$ 는 (7),(8)과 같이 나타낼 수 있으며 2차 정류 다이오드(D_{r1})의 전류는 감소하게 된다.

$$V_{ab}(t) = 0 \quad (7)$$

$$I_p(t) = I(t_2) - \frac{V_{in}}{2} \sqrt{\frac{C_{eq}}{L_{lk}}} \sin \omega_0 t \quad (8)$$

여기서,

$$\omega_0 : \text{모드 III 에서 공진 주파수, } \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_{lk} C_{eq}}}$$

$$C_{eq} = \left(\frac{C_{in2} \times C_{ss}}{C_{in2} + C_{ss}} \right)$$

4) 모드 IV : $t_3 \leq t \leq t_4$

모드 III과 유사한 모드로서 변압기 전류 방향이 모드 III과 반대 방향으로 흐르며 모드 III과 같은 기율기로 감소된다. 변압기 1차측 전압 $V_{ab}(t)$ 와 전류 $I_p(t)$ 는 식(9), (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{ab}(t) = 0 \quad (9)$$

$$I_p(t) = -\frac{V_{in}}{2} \sqrt{\frac{C_{eq}}{L_{lk}}} \sin \omega_0 t \quad (10)$$

5) 모드 V : $t_4 \leq t \leq t_5$

1차측 변압기에 전압 공급은 없지만 스위치 S4와 S2의 내장 다이오드 (D_{r2})를 통하여 부하에 전력이 공급된다. 이 모드에서 변압기 1차 전류가 흐르며 2차측은 환류 다이오드(D_w)를 통하여 부하에 전력이 공급되는 구간이다.

6) 모드 VI : $t_5 \leq t \leq t_6$

S3, S4가 도통 상태가 되어 2차측으로 전력이 전달되고 2차측 다이오드(D_{r2})를 통하여 부하에 전력이 공급된다. 이 모드에서 변압기 1차 전압 $V_{ab}(t)$ 와 전류 $I_p(t)$ 는 식(11), (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{ab}(t) = -\frac{1}{2} V_{in} \quad (11)$$

$$I_p(t) = I(t_5) - \frac{(V_{in}/2) - V_o}{L_{lk} + n_1 L_o} t \quad (12)$$

나머지 반주기는 상기의 과정과 동일하다.

2.3 제안된 ZVZCS Three-Level 컨버터

그림 5는 제안된 1차측 결합 인덕터를 이용한 ZVZCS Three-Level 컨버터를 나타낸다. 제안된 컨버터는 기존의 ZVS Three-Level 컨버터의 1차측에 결합 인덕터 1개를 사용하여 영전압·영전류 스위칭이 가능한 ZVZCS Three-Level 컨버터이다.

그림 5와 그림 6은 제안된 ZVZCS Three-Level 컨버터의 모드별 동작 파형과 등가회로를 나타낸다.

2.4 제안된 ZVZCS TL 컨버터의 결합 인덕터 설계

제안된 ZVZCS Three-Level 컨버터의 스위치 S2와 S3의 영전류 스위칭을 위한 결합인덕터의 설계는 환류 시간의 해석을 통하여 설계하여야 한다[2].

환류시간 T_{fw} 는 식(13)으로 근사화 될 수 있다.

$$T_{fw} = t_3 - t_2 = \frac{L_{lk} I_1(t_2)}{V_{aux}} \quad (13)$$

또한, 결합인덕터 L_{c2} 에 인가되는 전압 V_{aux} 는 식(14)로 나타낼 수 있다.

$$V_{aux} = V_{in} / (2 \cdot n_2) \quad (14)$$

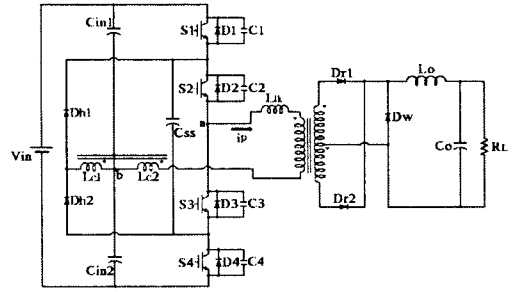


그림 5. 제안된 ZVZCS Three-Level 컨버터 회로

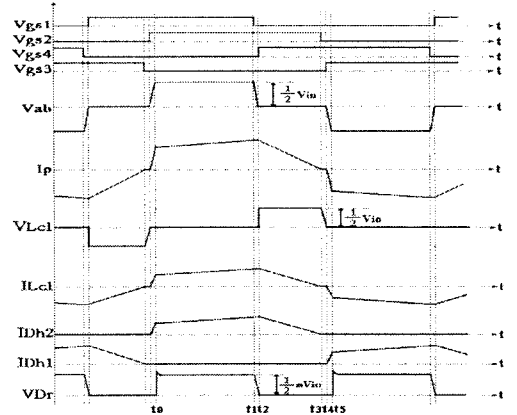


그림 6. 제안된 ZVZCS TL 컨버터의 모드별 동작

제안된 컨버터에서 환류시간 T_{fw} 와 최대 듀티 사이의 관계는 식(15)로 나타낼 수 있다.

$$T_{fw} < (1 - D_{max}) T_s \quad (15)$$

여기서, D_{max} : 최대 듀티
 T_s : 스위칭 주기

따라서, 결합인덕터 권선비 n_2 는 식(13), (14)와 (15)의 환류시간을 고려하여 식(16)으로 산정할 수 있다.

$$n_2 < \frac{V_{in} (1 - D_{max}) T_s}{2 L_{lk} I_{peak}} \quad (16)$$

여기서, I_{peak} : 변압기 1차측에 흐르는 최대 전류

본 논문에서는 식(16)의 조건을 이용하여 결합인덕터의 권선비 n_2 를 7.33으로 설계하였다.

2.5 실험 결과 및 분석

표 1은 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터 값을 나타낸다.

그림 7은 일반적인 ZVS Three-Level 컨버터, 그림 8은 제안된 ZVS Three-Level 컨버터, 그림 9는 제안된 ZVZCS Three-Level 컨버터에 대해 각각의 변압기 전압 및 전류 파형을 나타낸다.

표 2는 각각의 Three-Level 컨버터의 보조회로 구성과 특성을 나타내며, 그림 10은 각각의 방식에 대한 효율 비교한 결과이다.

제안된 ZVS Three-Level 컨버터는 가장 경제적인 보조회로 특성을 보이고, 제안된 ZVZCS Three-Level 컨버터는 최소 소자로 구성된 보조 회로에 의해 영전압·영전류 스위칭이 가능하고, 동시에 보조 다이오드의 전압 스트레스가 $V_{in}/2$ 이며, 전부하 범위에서 우수한 효율 특성을 보인다.

표 1. 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터

입력전압 (V_{in})	400 V
출력전압 (V_o)	27 V
최대출력 (P_o)	2.0 kW
주 변압기	EC 90의 1/2. TDK $N_1 : N_2 = 13 : 4$, $L_{lk} = 2.933\mu\text{H}$
입력단 커패시터 (C_{in})	470 μF X6
Flying 커패시터 (C_{ss})	100 μF
주 스위치(S)	FM2G50US60. FAIRCHILD
2차측 정류 다이오드 (D_r)	DEXI 2X121-02A. IXYS
1차측 보조 다이오드 (D_h)	DEXI 2X61. IXYS
2차측 환류 다이오드 (D_w)	DEXI 30-02A X2. IXYS
출력단 인덕터 (L_o)	1.030 mH
출력단 커패시터 (C_o)	5600 μF X4
1차측 결합 인덕터 (L_c)	PQ5050. TDK $N_{Lc1} : N_{Lc2} = 22 : 3$ $L_{c1} = 2.313\text{mH}$, $L_{c2} = 55.06\mu\text{H}$ $L_{lk1} = 20.16\mu\text{H}$, $L_{lk2} = 0.587\mu\text{H}$
스위칭 주파수 (f)	40 kHz

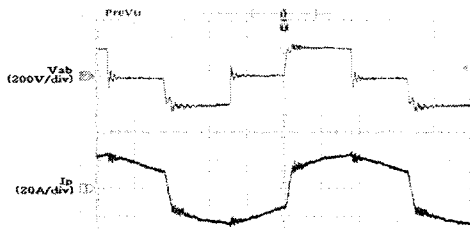


그림 7. 일반적인 ZVS Three-Level 컨버터의 변압기 전압·전류 파형 (4 $\mu\text{s/div}$)

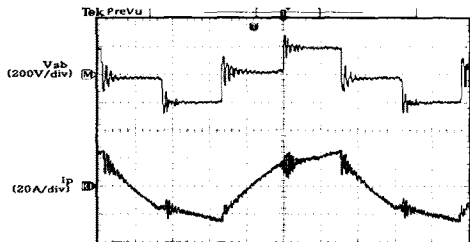


그림 8. 제안된 ZVS Three-Level 컨버터의 변압기 전압·전류 파형 (4 $\mu\text{s/div}$)

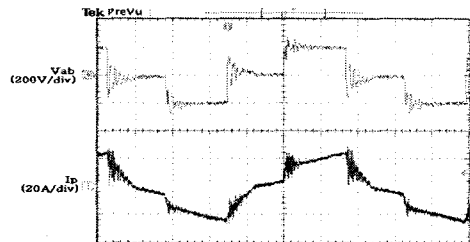


그림 9. 제안된 ZVZCS Three-Level 컨버터의 변압기 전압·전류 파형 (4 $\mu\text{s/div}$)

3. 결 론

본 논문에서는 최소 보조회로를 이용한 ZVS/ZVZCS Three-Level 컨버터에 관하여 논하였다. 제안된 ZVS TL 컨버터는 1차측 환류 다이오드(D_{c1} , D_{c2})를 제거하여 최소 소자로 구성된 보조회로에 의해 영전압 스위칭이

표 2. Three-Level 컨버터의 보조회로 구성과 특성

Three-Level(TL) 컨버터	보조회로 구성	효율[%] 최대	특 성
일반적인 ZVS TL 컨버터(1)	다이오드 2개	92.4	ZVS 스위칭
제안된 ZVS TL 컨버터	없음	91.8	ZVS 스위칭 최소 보조회로
기존의 3권선 결합인덕터 ZVZCS TL 컨버터(3)	결합인덕터 1개 다이오드 2개	93.3	ZVZCS 스위칭 보조회로 전압 : $V_{in}/2$
기존의 2권선 결합인덕터 ZVZCS TL 컨버터(2)	결합인덕터 1개 다이오드 2개	94	ZVZCS 스위칭 보조회로 전압 : V_{in}
제안된 ZVZCS TL 컨버터	결합인덕터 1개	94.2	ZVZCS 스위칭 보조회로 전압 : $V_{in}/2$ 최소 보조회로

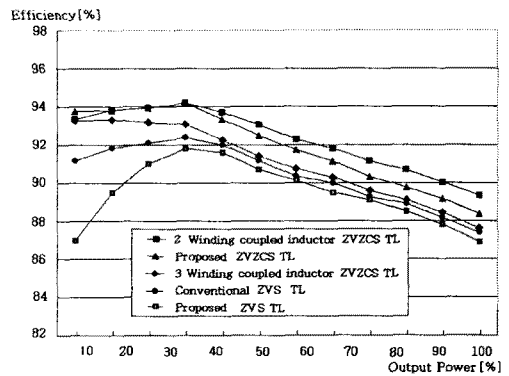


그림 10. 각각의 방식에 대한 효율 비교

가능하다. 또한, 제안된 ZVZCS TL 컨버터는 1차측에 결합인덕터를 추가함으로써 최소 소자로 구성된 보조 회로에 의해 영전압·영전류 스위칭이 가능하고, 동시에 보조 다이오드의 전압 스트레스가 작으며 특히 순환전류가 저감되어 주회로 소자의 도통손실과 변압기 손실이 줄어들고, 2차측 정류기의 역회복 손실이 저감되어 대전력 응용에 적합하리라 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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.
- [2] Jin-Yong Bae, Yong Kim, and Geun-Soo Choi, "A study on the Zero-Voltage and Zero-Current-Switching Three-Level DC/DC Converter using Primary Coupled Inductor," KIEE Journal of Electrical Engineering, Vol. 54B, No. 9, pp. 414-421, 2005.
- [3] 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.
- [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 Electronic s, Vol. 17, pp. 898-904, November 2002.