

보조 회로의 전압 스트레스를 저감한 ZVZCS Three-Level DC/DC 컨버터에 관한 연구

배진용*, 김 용**, 백수현**, 조규만***, 최근수§

*특허청, **동국대학교, ***청주기능대학, §디지아이

ZVZCS(Zero-Voltage and Zero-Current-Switching Three-Level DC/DC Converter reducing voltage stress of auxiliary circuit)

Jin-Yong Bae*, Yong Kim**, Soo-Hyun Baek**, Kyu-Man Cho***, Geun-Soo Choi§

*Korean Intellectual Property Office, **Dongguk University, ***Chongju Polytechnic College, §DGI

Abstract - A ZVZCS(Zero-Voltage and Zero-Current-Switching) Three-Level DC/DC Converter reducing voltage stress of auxiliary circuit is proposed. The principle of operation, feature and design considerations are illustrated and verified through the experiment with a 2kW 40kHz IGBT based experimental circuit.

1. 서 론

본 논문에서는 고전압 입력, 대전류 출력 분야에 응용 할 수 있는 새로운 ZVZCS(Zero-Voltage and Zero-Current-Switching) Three-Level DC/DC 컨버터에 관하여 논하였다. 이제까지 Three-Level 컨버터의 영전압·영전류 스위칭에 관한 연구는 2차측에 보조회로를 부가하여 변압기 환류손실을 저감하는 방안에 대하여 주된 초점을 맞추었으나,[1-5] 대전류 출력의 경우 2차측 보조회로의 전류 스트레스가 커지는 문제점을 지니므로 이의 개선방안으로 1차측 보조회로를 이용한 의한 영전압·영전류 Three-Level 컨버터가 제안되었다.[6-7]

본 연구에서는 결합인덕터로 구성된 1차측 보조 회로 방식의 ZVZCS Three-Level 컨버터를 제안하고자 한다. 제안된 컨버터는 최소 소자로 구성된 보조회로에 의해 ZVZCS 스위칭이 가능하고, 동시에 보조다이오드의 전압 스트레스가 작으며, 능동스위치나 손실성 소자가 없기 때문에 고효율 저비용을 이를 수 있다.

2. 본 론

2.1 이론적인 파형 및 동작특성

그림 1은 1차측 결합인덕터를 이용한 ZVZCS Three-Level DC/DC 컨버터를 나타낸다. 제안된 컨버터는 기존의 ZVS Three-Level 컨버터의 1차측에 결합인덕터를 추가함으로써 최소 소자로 구성된 보조 회로에 의해 영

전압·영전류 스위칭이 가능하고, 동시에 보조 다이오드의 전압 스트레스가 작으며 특히 순환전류가 저감되어 주회로 소자의 통로손실과 변압기 손실이 줄어들고, 2차측 정류기의 역회복 손실이 저감되는 특징을 지닌다. 기존의 ZVZCS Three-Level 컨버터는 대전류 출력의 경우 2차측 보조회로의 전류 스트레스가 커지는 반면에 제안된 1차측 보조회로 방식의 컨버터는 전류 스트레스가 작고, 능동스위치나 손실성 소자가 없기 때문에 고밀도·고효율의 향상된 특성을 지닌다.

그림 2와 그림 3은 제안된 ZVZCS Three-Level DC/DC 컨버터의 모드별 동작 파형과 동가회로를 나타낸다. 제안된 회로는 반주기에 5개의 모드를 지나고 있으며, 거의 50%의 듀티 주기마다 위상 이동방식의 스위칭 형태로 동작한다. 위상이동은 스위치 S1과 S2, S3와 S4사이에서 일어난다.

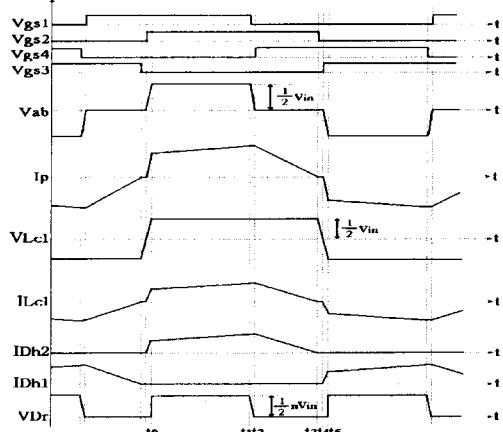


그림 2 제안된 회로의 이론적인 각부 파형

1) 모드 I : $t_0 \leq t \leq t_1$

스위치 S1과 S2의 턴온시 입력 전력이 출력측으로 전달되고, 1차측의 결합인덕터(L_{c1})과 보조 다이오드(D_{R2})에는 전류가 흐른다. 이 때 변압기 1차측에 흐르는 전류는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_p(t) = I(t_0) + \frac{(1 - 1/n_2)(V_{in}/2) - V_o}{\frac{n_1}{L_{lk}} + n_1 L_0} t \quad (4)$$

여기서, n_2 : 결합인덕터의 권선비 (N_{Lc1}/N_{Lc2})

2) 모드 II : $t_1 \leq t \leq t_2$

모드 I에서 스위치 S1이 턴오프되면 변압기 1차측에

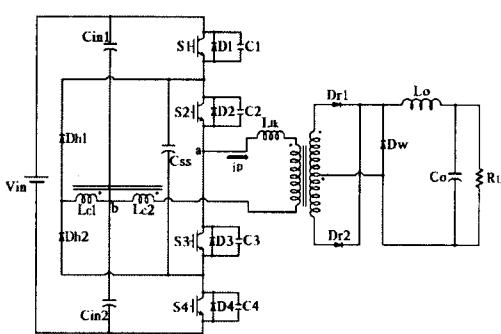
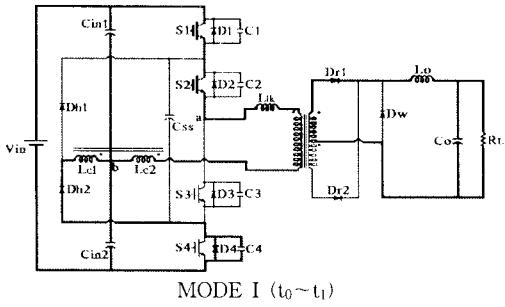
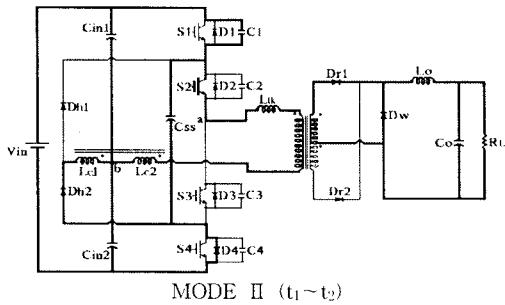


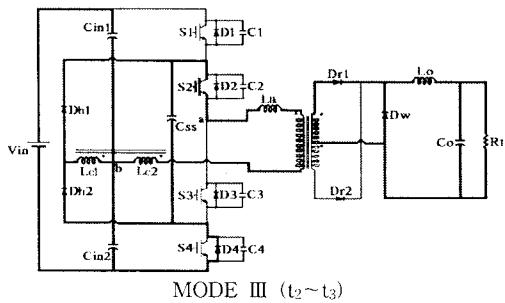
그림 1. 제안된 ZVZCS Three-Level 컨버터



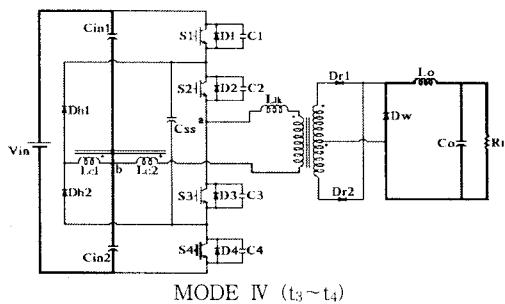
MODE I ($t_0 \sim t_1$)



MODE II ($t_1 \sim t_2$)



MODE III ($t_2 \sim t_3$)



MODE IV ($t_3 \sim t_4$)

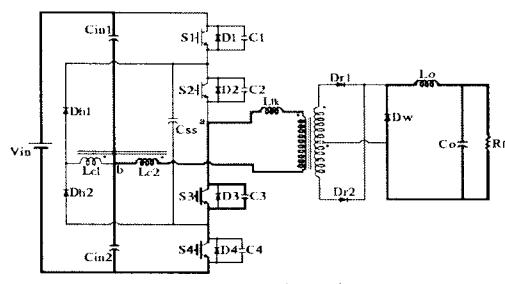


그림 3. 제안된 회로의 모드별 동작

흐르는 전류는 변압기의 1차측 누설인덕턴스(L_{lk})에 의해 계속적인 흐름을 유지하려 한다. 따라서 스위치 S4의

내장 다이오드를 도통시키므로, 스위치 S4는 영전압 스위칭이 된다. 스위치 S1과 S4의 전압은 식(5),(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{S1}(t) = \frac{n_2}{1+n_2} [(V_{in}/2 - n_1 V_o)(1 - \cos \omega_o(t - t_1)) + I_1(t_1) Z_o \sin \omega_o(t - t_1)] \quad (5)$$

$$V_{S1}(t) = V_{in}/2 - \frac{C_{ss}}{C + C_{ss}} V_{S1}(t) \quad (6)$$

여기서,

n_1 : 주 변압기의 권선비(N_1/N_2)

$$\omega_o : \text{모드 } \text{I} \text{에서 공진 주파수}, \omega_o = \sqrt{\frac{1}{L_{eq} C_{eq}}} \quad (7)$$

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

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

$$C_{eq} = \left(C + \frac{CC_{ss}}{C+C_{ss}} \right) \left(\frac{n_2}{1+n_2} \right)$$

$$C = C_1 = C_2$$

이 때 변압기 1차측 전압, 전류는 식(7)(8)과 같다.

$$V_{ab}(t) = \frac{I_o}{n_1(C_1 + C_i)} t \quad (7)$$

$$I_p(t) = \frac{V_{in}/2 - n_1 V_o}{Z_o} \sin \omega_o(t - t_1) + I_1(t_1) \cos \omega_o(t - t_1) \quad (8)$$

3) 모드 II : $t_2 \leq t \leq t_3$

스위치 S4가 영전압 스위칭 조건에서 편온되고 동시에 변압기 1차측에 흐르는 전류는 Three-Level 다이오드(D_{c1})을 통하여 계속적인 흐름을 유지한다. 1차측에서 2차측으로 전달되는 전력이 감소하므로, 2차측 출력인덕터(L_o)의 에너지는 환류 다이오드(D_w)를 통하여 출력측으로 방전하며, 누설인덕터의 에너지는 1차측 결합인덕터와 보조 다이오드(D_{h2})를 통하여 입력 커��시터로 전달된다. 이 때 변압기 전류는 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_p(t) = I_1(t_2) - \frac{V_{aux}}{L_{lk}} (t - t_2) \quad (9)$$

여기서, $V_{aux} = V_{in}/(2 \cdot n_2)$

4) 모드 III : $t_3 \leq t \leq t_4$

누설인덕턴스(L_{lk})의 에너지가 모두 소모되면, 1차측 변압기에는 전류와 전압의 흐름이 없다. 따라서 스위치 S3의 영전류 스위칭 조건을 만족하게 된다.

5) 모드 IV : $t_4 \leq t \leq t_5$

스위치 S3가 영전류 스위칭 조건에서 편온되며, 1차측의 전류는 누설인덕턴스(L_{lk})와 결합인덕터(L_{c1})의 영향으로 급격하게 증가할 수 없다. 따라서 1차측 전류는 식(10)과 같다.

$$I_p(t) = - \frac{V_{in}}{2(L_{lk} + L_{c2})} (t - t_4) \quad (10)$$

이 때의 2차측 정류기 전압은 여전이 0이다.
나머지 반주기는 상기의 과정과 동일하다.

2.2 결합 인덕터의 설계

제안된 컨버터의 스위치 S2와 S3의 영전류 스위칭을 위한 결합인덕터의 설계는 환류시간의 해석을 통하여 설계하여야 한다.

환류시간 T_{fw}는 식(11)로 근사화 될 수 있다.

$$T_{fw} = t_3 - t_2 = \frac{L_{lk} I_1(t_2)}{V_{aux}} \quad (11)$$

또한 결합인덕터 L_{c2} 에 인가되는 전압 V_{aux} 는 식(12)로 나타낼 수 있다.

$$V_{aux} = V_m / (2 \cdot n_2) \quad (12)$$

제안된 컨버터에서 환류시간 T_{fw} 와 최대 드티 사이의 관계는 식(13)으로 나타낼 수 있다.

$$T_{fw} < (1 - D_{max}) T_s \quad (13)$$

여기서, D_{max} : 최대 드티
 T_s : 스위칭 주기

따라서, 결합인덕터 권선비 n_2 는 식(11), (12)와 (13)의 환류시간을 고려하여 식(14)로 산정할 수 있다.

$$n_2 < \frac{V_{in}(1 - D_{max}) T_s}{2 L_{lk} I_{peak}} \quad (14)$$

여기서, I_{peak} : 변압기 1차측에 흐르는 최대 전류

본 논문에서는 식(14)의 조건을 이용하여 결합인덕터의 권선비 n_2 를 7.33으로 설정하였다.

2.3 실험 결과 및 분석

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

그림 5는 기존의 ZVZCS Three-Level 컨버터[6], 그림 11은 제안된 ZVZCS Three-Level 컨버터에 대해 각각의 보조 다이오드(D_{hl})의 전압(V_{Dhl}) 및 전류(I_{Dhl}) 파형을

표 1. 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터

입력전압 (V_{in})	400 V
출력전압 (V_o)	27 V
최대 출력 (P_o)	2.0 kW
주 변압기	EC 90의 1/2. TDK $N_1 : N_2 = 13 : 8, L_{lk} = 2.933\mu H$
입력단 커패시터 (C_{in})	470 μF X6
Flying 커패시터 (C_{ss})	100 μF
주 스위치(S)	FM2G50US60. FAIRCHILD
2차측 정류 다이오드 (D)	DEXI 2X121 02A. IXYS
1차측 보조 다이오드 (D _b)	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 $N_{Lc1} : N_{Lc2} = 22 : 3$ $L_{c1} = 2.313mH, L_{c2} = 55.06\mu H$ $L_{lk1} = 20.16\mu H, L_{lk2} = 0.587\mu H$
스위칭 주파수 (f)	40 kHz

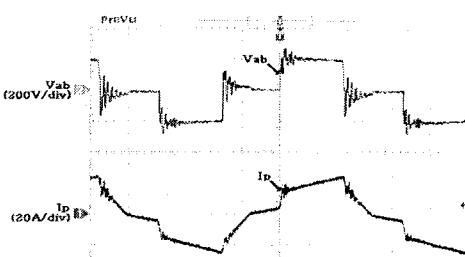


그림 4. 제안된 ZVZCS Three-Level 컨버터의 변압기 전압 · 전류 파형 (4us/div)

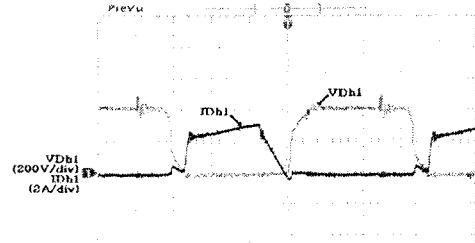


그림 5. 기존의 ZVZCS Three-Level 컨버터의 보조 다이오드(D_{hl}) 전압 · 전류 파형[6] (4us/div)

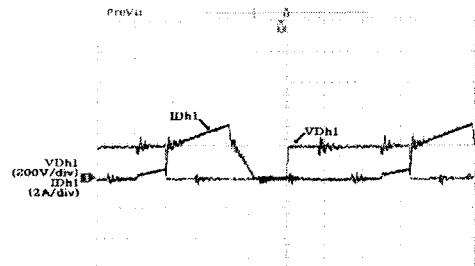


그림 6. 제안된 ZVZCS Three-Level 컨버터의 보조 다이오드(D_{hl}) 전압 · 전류 파형 (4us/div)

나타낸다. 기존의 ZVZCS Three-Level 컨버터는 보조 다이오드의 (D_{hl})의 전압 스트레스가 V_{in} 이상이지만 제안된 컨버터는 $V_{in}/2$ 으로 저감됨을 알 수 있다.

3. 결 론

제안된 컨버터는 기존의 ZVS Three-Level 컨버터의 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] 배진용, 김용, 권순도, 김필수, 이은영, "2차측 보조회로를 이용한 ZVZCS Three Level DC/DC 컨버터에 관한 연구," 대한전기학회 EMECS 춘계학술대회 논문집, 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 Electronic s, Vol. 17, pp. 898-904, November 2002.
- [6] 배진용, 김용, 권순도, 김필수, 이규훈, "1차측 결합인덕터를 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.