2001년도 대한전기학회 EMECS학회 추계학술대회 논문집 (2001.10.26-27)

2차측 결합 인덕터를 이용한 ZVZCS Three Level DC/DC 컨버터에 관한 연구

배진용* . 김 용* . 백수현* . 김필수** . 이은영**
*동국대학교. **대림대학

A Study on the Zero-Voltage and Zero-Current-Switching Three Level DC/DC Converter using Secondary Coupled Inductor

Jin-Yong Bae* . Yong Kim* . Soo-Hyun Baek* . Pill-Soo Kim** . Eun-Young Lee**
*Dongguk University. **Daelim College

Abstract - A ZVZCS(Zero Voltage and Zero Current Switching) Three Level DC/DC Converter is presented to secondary auxiliary circuit. The new converter presented in this paper used a phase shift control with a flying capacitor in the primary side to achieve ZVS for the outer switch. A secondary auxiliary circuit, which consists of one small capacitor two small diode and one coupled inductor, is added in the secondary to provides ZVZCS conditions to primary switches, ZVS for outer switches and ZCS for inner switches. Many advantages including simple circuit topology high efficiency, and low cost make the new converter attractive for high power applications The principle of operation, feature and design considerations are illustrated and verified through the experiment with a 1㎾ 50㎑ IGBT based experimental circuit.

1. 서 론

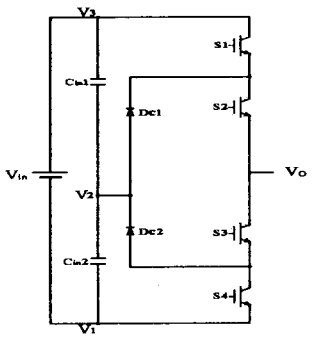
일반적으로 IGBT는 BJT에 비해서 구동이 간편하고 고주파 스위칭이 가능하기 때문에 전력변환 장치에 널리 사용되어 왔다. 초기의 IGBT는 도통 전압이 높은 단점을 가지고 있었으나 최근의 IGBT는 도통전압이 크게 감소하여, 대용량 응용분야에는 IGBT가 고가의 MOSFET를 대부분 대체하고 있다. 그러나, IGBT는 턴오프시 꼬리(tail) 전류가 생기는 문제로 최대 동작 주파수가 20~30㎑로 제한되는 단점이 있다. IGBT의 스위칭 주파수를 높이기 위해서는 스위치의 턴오프시 발생되는 스위칭 손실을 줄이는 것이 필요한 데 스위치 양단에 비교적 큰 커패시터를 부착한 상태에서 영전압 스위칭(ZVS)을 하거나, 영전류 스위칭(ZCS)으로 이 문제를 해결할 수 있다.[1-5] 영전류 스위칭의 경우 턴오프 하기 이전에 소수 캐리어가 완전히 제거되어 꼬리 전류가 없어지기 때문에 더욱 바람직하다고 할 수 있다. 기존의 ZVS Three Level 컨버터는 안정한 영전압 동작을 확보하기 위해 고주파 변압기의 누설 인덕터를 증가시키거나 또는 고주파 변압기와 직렬로 인덕터를 삽입하는 방법이 사용된다.[2] 이러한 방법은 유효 듀티 사이클을 감소시키며, 누설 인덕터에 축적된 에너지와 1차측으로 반영된 출력측 평활용 인덕터의 에너지가 환류하는 구간이 생기므로 컨버터의 도전손실이 커진다.

이러한 문제를 해결하기 위해 기존의 경우 2차측에 한 개의 커패시터와 두 개의 다이오드를 이용한 보조회로를 부가함으로써, 누설 인덕터와 2차측 보조 커패시터가 공진을 일으켜 주 스위치의 영전압 영전류 스위칭(ZVZCS)이 가능하였다.[1][3] 새로운 컨버터는 기존의 보조 회로에 결합 인덕터를 추가하여, 누설 인덕터, 2차측 보조 커패시터, 2차측 결합 인덕터가 공진을 일으키므로 기존의 경우보다 도전 손실이 저감된 고효율 컨버터를 구현할 수 있었다. 제안된 컨버터는 기존의 풀브리지 컨버터에 비하여 스위칭 손실이 적으므로 고전압 응용 분야에 적합하다. 또한 보조 회로에 능동 스위치나 손실성 소자가 없기 때문에 고효율 저비용을 이룰 수 있다.

2. 본 론

2.1 기존의 Three Level 컨버터

그림 1은 Three Level 결선을 나타낸다.[2-4] Three Level 결선은 4개의 스위치, 2개의 다이오드, 2개의 커패시터에 의해 구성되며, 각 스위치의 스위칭 상태에 따라 서로 다른 출력 전압이 나타나게 된다.



스위치 상태				출력전압 (Vo)
S1	S2	S3	S4	
1	1	0	0	V3 (=Vin)
0	1	1	0	V2 (=Vin/2)
0	0	1	1	V1 (=0)

그림 1. Three Level 결선 및 스위치 상태에 따른 출력 전압

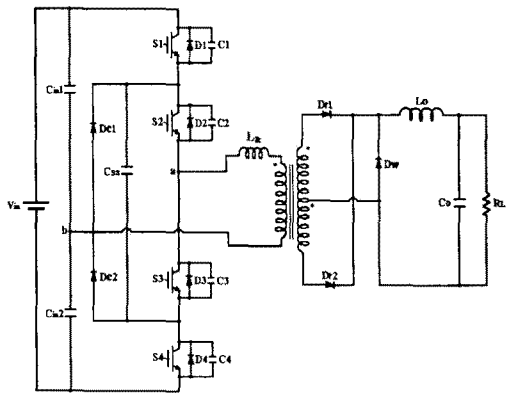
그림 2는 기존의 ZVS Three Level DC/DC 컨버터를 나타내었다. 주 스위치의 안정한 영전압 스위칭 동작을 위하여 고주파 변압기의 누설 인덕터가 저장하는 에너지가 스위치 커패시터와 고주파 변압기의 기생 커패시터를 충·방전 할 수 있도록 설계하여야 한다. 따라서 실제적인 ZVS 동작은 누설 인덕터에 저장된 에너지가 식 (1)을 만족해야 한다.

$$\frac{1}{2} L_{lk} I_{lk}^2 > \frac{4}{3} C_{mos} \frac{V_{in}^2}{2} + \frac{1}{2} C_{tr} \frac{V_{in}^2}{2} \quad (1)$$

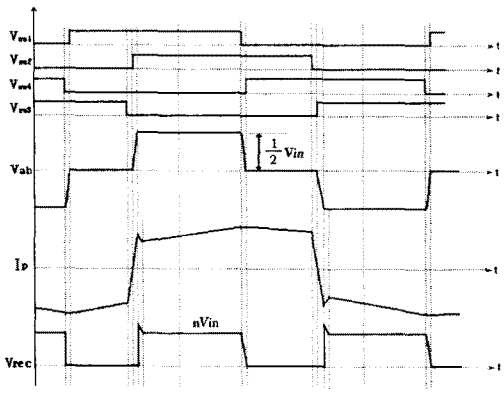
여기서

$\frac{4}{3} C_{mos}$: 일반적인 스위치 커패시터의 두배

C_{tr} : 고주파 변압기의 Winding 커패시터 (기생 커패시터)



(a) 컨버터 회로도



(b) 컨버터 각부파형

그림 2. 기존의 ZVS Three Level DC/DC컨버터

안정한 영전압 스위칭 동작 영역을 확보하기 위해 누설 인덕터(L_{lk})를 증가시키거나 또는 고주파 변압기와 직렬로 인덕터를 삽입하는 방법이 사용된다. 그러나 이러한 방법은 유효 듀티 사이클을 감소시키며, 누설 인덕터에 축적된 에너지와 1차측으로 반영된 출력측 평활용 인덕터의 에너지가 환류하는 구간이 생기므로 컨버터의 도전손실이 증가하며, 고주파 변압기의 이용율이 낮아지는 단점을 가지고 있다.

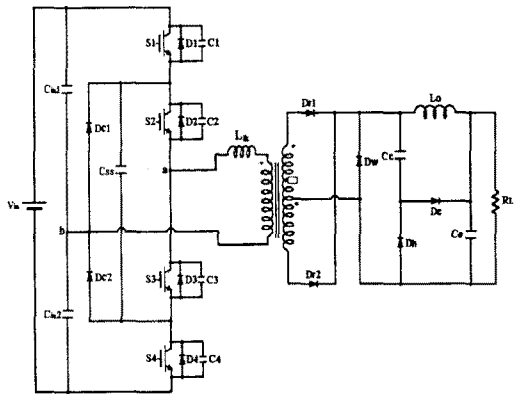
기존의 ZVS Three Level 컨버터는 특정 부하영역에서 ZVS 조건을 잃는다. 따라서 ZVS 동작을 할 수 있는 1차측 임계전류는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{crit} = \frac{V_{in}}{2}\sqrt{\frac{2}{L_{lk}}\left(\frac{4}{3}C_{mos}+\frac{1}{2}C_{tr}\right)} \qquad (2)$$

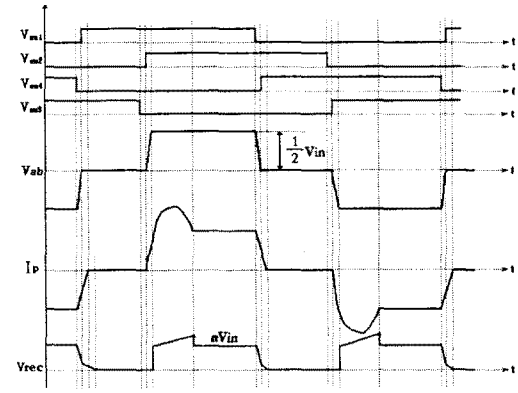
결과적으로 ZVS 동작은 1차측에 반영된 부하전류(I_{out})가 임계전류보다 클 때 이루어진다. 따라서 ZVS 동작 조건은 식 (3)으로 된다.

$$\frac{I_{out}}{n} > i_{crit} \qquad (3)$$

기존의 ZVS Three Level 컨버터의 문제점을 해결하기 위해서 2차측에 보조회로를 추가한 ZVZCS Three Level 컨버터가 제안되었다. 그림 3은 기존의 ZVZCS Three Level DC/DC 컨버터를 나타내었다. 주 회로 구성은 ZVS Three Level 컨버터의 2차측에 한 개의 커패시터와 두 개의 다이오드를 이용한 보조회로를 부가함으로써, 누설 인덕터와 2차측 보조 커패시터가 공진을 일으켜 주 스위치의 영전압 영전류 스위칭(ZVZCS)이 가능하였다.



(a) 컨버터 회로도



(b) 컨버터 각부파형

그림 3. 기존의 ZVZCS Three Level DC/DC컨버터

2.2 제안된 Three Level 컨버터

그림 4는 2차측 결합 인덕터를 이용한 ZVZCS Three Level DC/DC 컨버터를 나타낸다. 제안된 컨버터는 기존의 ZVZCS Three Level 컨버터의 2차측에 결합 인덕터를 추가함으로써 안정된 소프트 스위칭 동작 영역이 확보되며, 특히 순환전류가 차단되어 주회로 소자의 도통손실과 변압기 손실이 줄어들고, 2차측 정류기의 역회복 손실이 저감되는 특징을 지닌다. 기존의 ZVZCS Three Level 컨버터는 고주파 변압기의 누설 인덕터와 2차측 보조 커패시터의 공진을 이용하는 반면에 제안된 방식은 누설 인덕터, 2차측 보조 커패시터, 2차측 결합 인덕터가 공진을 일으켜 기존의 ZVZCS Three Level 컨버터에 비하여 고밀도 고효율의 향상된 특성을 가진다.

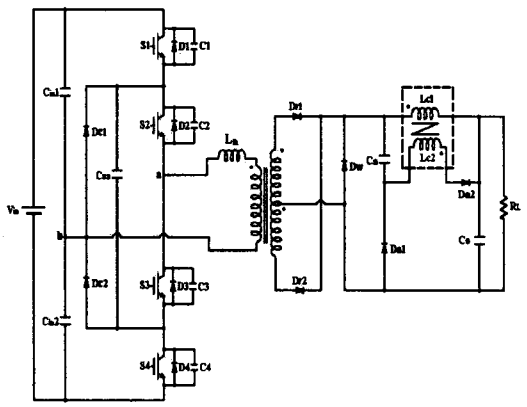


그림 4. 제안된 ZVZCS Three Level DC/DC컨버터

그림 5와 그림 6는 ZVZCS Three Level DC/DC 컨버터의 모드별 동작 파형과 등가회로를 나타낸다. 제안된 회로는 반주기에 6개의 모드를 가지고 있으며, 거의 50%의 듀티 주기마다 위상 이동방식의 스위칭 형태로 동작한다. 위상이동은 스위치 S1과 S2, S3와 S4사이에서 일어난다.

모드별 정상상태 해석을 위해서 다음과 같이 가정한다.

1) 모든 소자는 이상적이다.
2) C_{in} 양단의 리플 전압은 무시한다.
3) 변압기 2차측의 누설 인덕턴스는 무시한다.
4) 출력단 결합 인덕터 L_{c1}은 변압기 1차측 누설인덕터 L_{lk}보다 충분히 큰 값이고, L_{c1}에 흐르는 전류는 항상 일정하다.

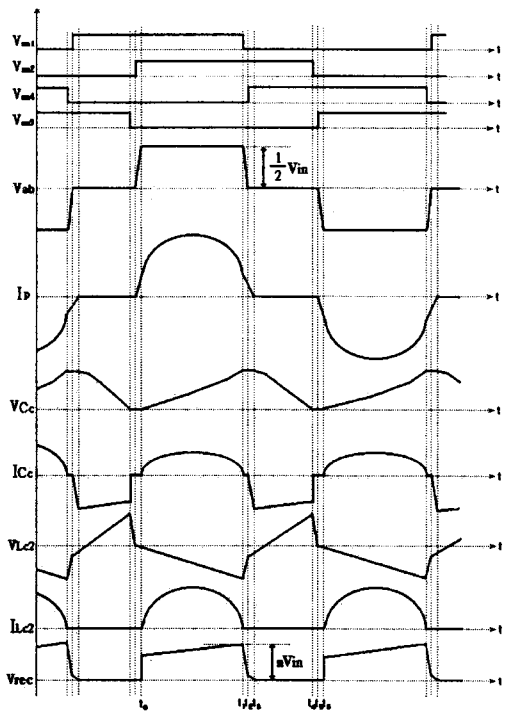
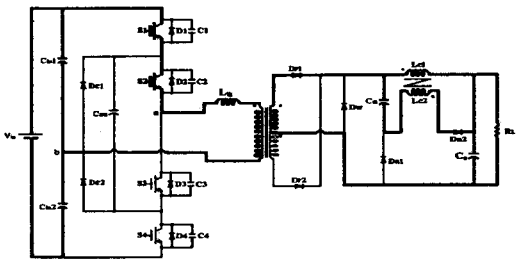
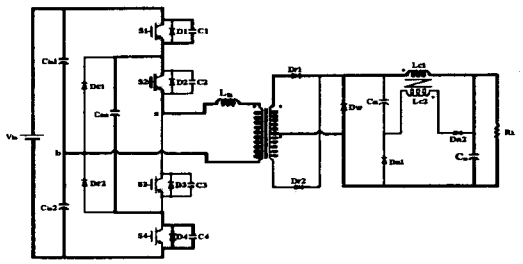


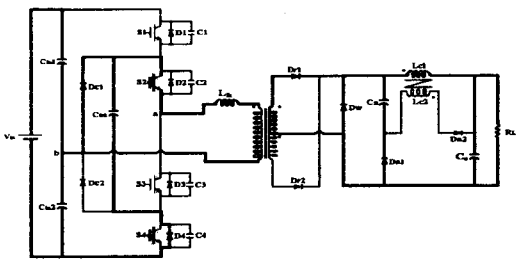
그림 5. 이론적인 회로 각부 파형



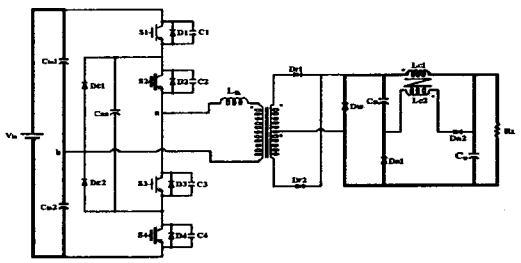
MODE I ($t_0 \sim t_1$)



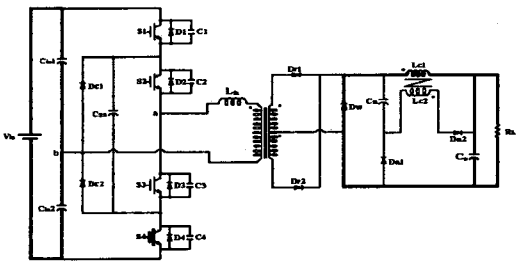
MODE II ($t_1 \sim t_2$)



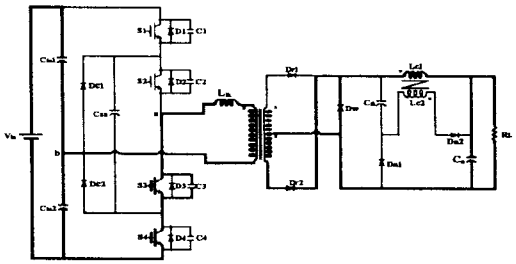
MODE III ($t_2 \sim t_3$)



MODE IV ($t_3 \sim t_4$)



MODE V ($t_4 \sim t_5$)



MODE Ⅵ (t_5~ t_6)

그림 6. 제안된 회로의 모드별 동작

1) 모드 Ⅰ : $t_0 \le t \le t_1$

스위치 S1과 S2의 턴온시 입력 전력이 출력측으로 전달되고, 2차측의 보조 커패시터(C_a), 결합 인덕터(L_c2), 보조 다이오드(D_a2)를 통하여 보조 커패시터는 충전된다. 보조 커패시터(C_a)는 1차측의 누설 인덕턴스(L_{lk}), 2차측의 결합 인덕터(L_c2)와 공진을 일으키므로 도전 손실이 저감된다. 이 때 커패시터 전압(V_{ca})과 전류(I_c)는 다음과 같다.

$$Vc_a(t) = \left(\frac{V_s}{n} - V_o\right)[1-\cos(\omega_s t)] \qquad (4)$$

$$I_c(t) = -\sqrt{\frac{C_a}{L_{lk}}}\left(\frac{V_s}{n} - V_o\right)\sin(\omega_s t) \qquad (5)$$

여기서

n : 주 변압기 권선비(N_1:N_2)

2) 모드 Ⅱ : $t_1 \le t \le t_2$

모드 Ⅰ에서 스위치 S1이 턴오프되면 변압기 1차측에 흐르는 전류는 변압기의 1차측 인덕턴스에 의하여 계속적인 흐름을 유지하려 한다. 따라서 스위치 S4의 커패시터를 방전시키고, 내장 다이오드를 도통시키므로, 스위치 S4는 영전압 스위칭이 된다. 변압기 1차측 전압은 식 (6)과 같다.

$$V_{ab}(t) = \frac{I_o}{n(C_1+C_4)}t \qquad (6)$$

3) 모드 Ⅲ : $t_2 \le t \le t_3$

스위치 S4가 영전압 스위칭 조건에서 턴온되고 동시에 변압기 1차측에 흐르는 전류는 Three Level 다이오드(D_c1)을 통하여 계속적인 흐름을 유지한다. 1차측에서 2차측으로 전달되는 전력이 감소하므로, 2차측의 보조 커패시터(C_a)의 에너지는 보조 다이오드(D_a1)를 통하여 출력측으로 방전한다. 이 모드의 끝에서 1차측 전류는 거의 0이 되며, 2차측 전압을 V_β라고 정의한다.

4) 모드 Ⅳ : $t_3 \le t \le t_4$

누설 인덕턴스(L_{lk})의 에너지가 모두 소모되면, 1차측 변압기에는 전류와 전압의 흐름이 없다. 따라서 2차측 보조 커패시터(C_a)의 에너지는 보조 다이오드(D_{a1})를 통하여 부하로 방전되고, 동시에 출력 인덕터(L_o)의 에너지는 환류 다이오드(D_w)를 통하여 부하로 전달된다. 보조 커패시터(C_a)의 전압(Vc_a)은 식 (7)과 같다.

$$Vc_a(t) = -\frac{I_o}{C_a}t + V_\beta \qquad (7)$$

5) 모드 Ⅴ : $t_4 \le t \le t_5$

스위치 S2가 턴오프되는 구간으로 모드 5에서 보조 커패시터의 에너지가 모두 방전되며, 따라서 2차측 보조 회로의 전류 흐름은 없고, 전력은 2차측의 L_o, C_o필터를 통해 부하로 방전된다.

6) 모드 Ⅵ : $t_5 \le t \le t_6$

스위치 S3가 영전류 스위칭 조건에서 턴온되며, 1차측의 전류는 누설 인덕턴스(L_{lk})의 영향으로 급작스럽게 증가 할 수 없다. 따라서 1차측 전류는 식 (8)과 같다.

$$I_p = \frac{V_s}{L_{lk}}t \qquad (8)$$

이 때의 2차측 정류기 전압은 여전이 0이다.

나머지 반주기는 상기의 과정과 동일하다.

2.3 실험 결과

제안된 방식의 타당성을 검증하기 위해 50㎑, 1㎾ ZVZCS Three Level DC/DC 컨버터를 제작하여 실험하였다. 표 1은 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터 값을 나타낸다.

표1. 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터

입 력 전 압	300 V
출 력 전 압	48 V
주 변 압 기	EE5530. MAGNETICS 26 : 8 L_{lk} = 8uH
입력단 커패시터	100 uF
Flying 커패시터	100 uF
주 스 위 치	SM2GN50N S60. SAMSUNG
2차측 다이오드	DEXI 2X61. IXYS
2차측 보조 커패시터	0.47 uF
2차측 출력 인덕터(Lc1)	38 uH
2차측 결합 인덕터(Lc2)	38 uH
출력단 커패시터	1000 uF
스위칭 주파수	50 ㎑

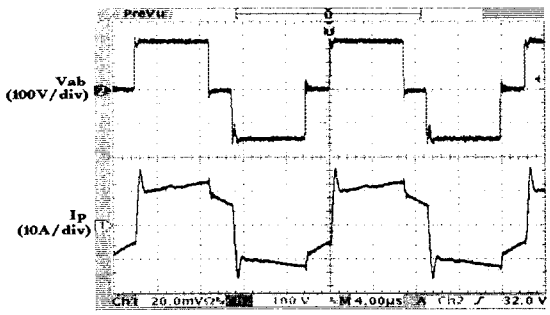


그림 7. 기존의 ZVS Three Level 컨버터의 변압기 전압 · 전류 파형

그림 7은 기존의 ZVS Three Level 컨버터의 경우이고, 그림 8은 기존의 ZVZCS Three Level 컨버터의 경우이며, 그림 9는 제안된 ZVZCS Three Level 컨버터의 경우 1차측 변압기 전압(V_{ab}) 및 전류(I_p) 파형을 나타낸다. 제안된 ZVZCS Three Level 컨버터가 변압기를 통하여 고밀도의 전력을 출력측으로 전달함을 알 수 있다.

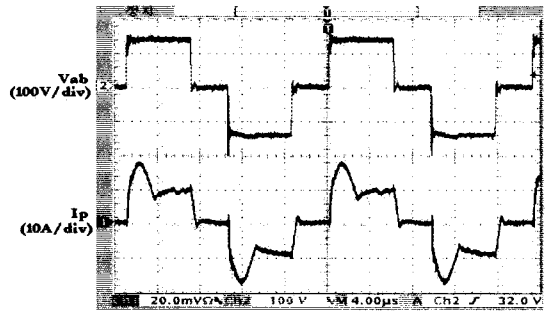


그림 8. 기존의 ZVZCS Three Level 컨버터의 변압기 전압·전류 파형

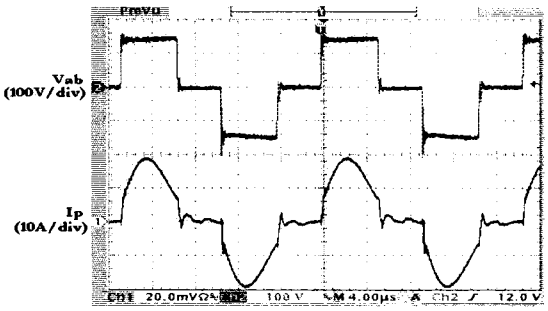


그림 9. 제안된 ZVZCS Three Level 컨버터의 변압기 전압·전류 파형

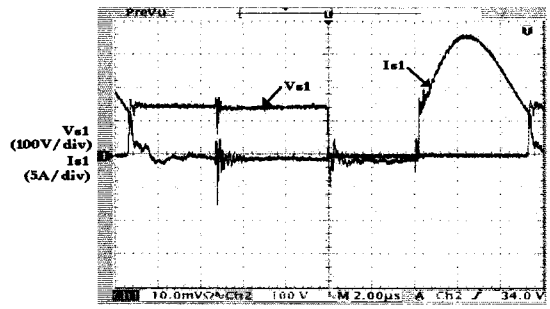


그림 10. 스위치 S1의 영전압 스위칭(ZVS) 파형

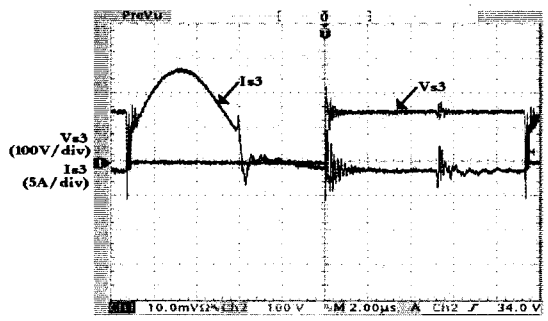


그림 11. 스위치 S3의 영전류 스위칭(ZCS) 파형

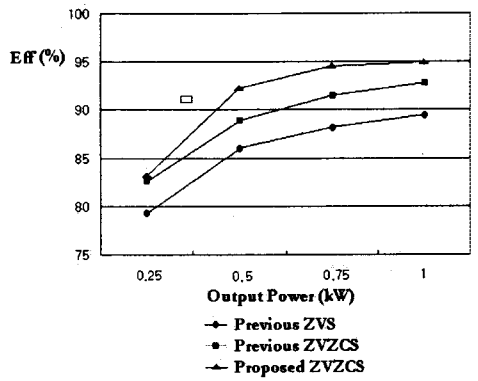


그림 12. 효율 측정

제안된 컨버터에서는 스위치 S1과 S4는 영전압 스위칭을 하고, 스위치 S2와 S3는 영전류 스위칭을 한다. 그림 10은 스위치 S1의 영전압 스위칭(ZVS) 파형을 나타내고, 그림 11은 스위치 S2의 영전류 스위칭(ZCS) 파형을 나타낸다. 그림 12는 제작된 컨버터의 효율 측정 결과이다. 최대 효율은 전부하시 94.9%이다. 기존의 방식에 비하여 향상된 효율을 나타내고 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 2차측 결합 인덕터를 이용한 ZVZCS Three Level DC/DC 컨버터를 제안했다. 1차측에는 Three Level 결선하고 여기에 위상이동 스위칭 방법과 Flying 커패시터(C_{SS})에 의하여 스위치 S1과 S4가 영전압 스위칭을 한다. 또한 2차측에는 결합 인덕터를 이용한 보조회로를 부가함으로써, 스위치 S2와 S3의 영전류 스위칭이 가능하며, 도전 손실이 현저히 저감됨을 확인할 수 있었다. 제안된 컨버터는 기존의 Three Level 컨버터 비하여 스위칭 손실이 적고, 고전압 응용 분야에 적합하다. 또한 보조 회로에 손실성 소자나 능동 스위칭 소자가 필요하지 않기 때문에 제작이 편리하고 높은 효율을 얻을 수 있어 대전력 응용에 적합하다.

[참 고 문 헌]

[1] J. G. Cho, 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 Transactions on Industry applications, Vol. 35, No. 1, January/February 1999.

[2] F. Canales, J. M. Burdio, Fred C. Lee, "A zero voltage switching three-level DC/DC converter", Telecommunications Energy Conference, pp. 512~517, 2000.

[3] 배진용, 김용, 권순도, 김필수, 이은영, "2차측 보조 회로를 이용한 ZVZCS Three Level DC/DC 컨버터에 관한 연구", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회, 춘계학술대회 논문집, pp. 320~323, KIEE 2001 춘계학술대회

[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, pp. 314~315, February 2000.

[5] Eun-Soo Kim, Kee-Yeon Joe, Soon-Gu Park, "An Improved ZVZCS PWM FB DC/DC Converter Using the Modified Energy Recovery Snubber", The Proceedings of The APEC'2000, pp. 119~124, February 2000