

Interleaved 부스트 컨버터에서 단일 공진 인덕터를 이용한 소프트 스위칭 기법

朴南柱[†], 李東明^{*}, 河東鉉^{**}, 玄東石^{***}

A Soft Switching Scheme using a Single Resonant Inductor in Interleaved Boost Converter

Nam-Ju Park, Dong-Myung Lee, Dong-Hyun Ha and Dong-Seok Hyun

요 약

본 연구에서는 연속도통모드에서 단일 공진 인덕터를 사용하여 ZVT를 갖는 interleaved 부스트 컨버터를 제안한다. ZVT셀을 가지는 제안된 ZVT는 Interleaved 부스트 컨버터는 간단한 회로를 가지며 필터 사이즈 감소와 저 비용이 가능하다는 장점을 가진다. 또한 고 전력 응용에 적합하다. 본 논문에서 제안된 ZVT 가지는 IBC의 회로와 동작 원리를 자세히 설명하였다. 그리고 제안된 ZVT 기법의 타당성은 실험을 통하여 검증하였다.

ABSTRACT

In this paper, an interleaved boost converter (IBC) with ZVT cell using a single resonant inductor in continuous conduction mode (CCM) is proposed. The IBC with the proposed ZVT cell has advantages such as a simple circuit, reduced size and low cost by using a single resonant inductor. It is more suitable for high power applications. The proposed ZVT cell circuit and principles for the IBC are explained in detail. The validity of the IBC with proposed ZVT cell is verified through experimental results.

Key Words : Interleaved boost converter (IBC), A single resonant inductor, Zero voltage switching(ZVS), Continuous conduction mode (CCM)

1. 서 론

최근에, 출력 전력을 증가시키기 위해, 두개 또는 그 이상의 컨버터가 병렬로 구성된 방식이 많이 연구 되

어지고 있다^{[1]-[9]}. 그 중, 교호 방식을 사용하는 interleaved boost converter (IBC)는 PFC 회로, 연료

전지 및 태양광의 충방전 장치 등으로 많이 연구가 되어지고 있다^{[2]-[11]}. IBC는 몇 개의 동일한 부스트 컨버터가 병렬로 연결되어 구성된다. 이들 컨버터들은 동일한 스위칭 주파수를 가지며 위상이 이동된 교호방식에 의해서 구동되며 기존의 단일 컨버터에 비해 입출력 리플 감소, 낮은 최대 전류, 교호 방식으로 인한 높은 스위칭 주파수를 가지며 또한 유지 보수, 고장 허용 및 낮은 열손실 등으로 인하여 효율개선과 높은 신뢰성을 얻을 수 있다. 뿐만 아니라, 높은 주파수로

[†]교신저자 : 정회원, 삼성전자 생활가전사업부 책임연구원

E-mail : pnano@hanyang.ac.kr

^{*}정회원, 홍익대 전자전기공학부 조교수

^{**}정회원, 현대로템(주) 기술연구소 책임연구원

^{***}정회원, 한양대 전기제어생체공학부 교수

접수일자 : 2007. 12. 10

1차 심사 : 2008. 2. 1

2차 심사 : 2008. 4. 2

심사완료 : 2008. 4. 21

동작함으로써 필터 사이즈를 최소화 시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 IBC는 크게 임계동작모드 (critical operation mode), 불연속 도통 모드 (discontinuous conduction mode: DCM), 연속 도통 모드 (continuous conduction mode: CCM)와 같이 3가지 모드로 동작이 나누어진다. 먼저, 임계동작모드에서 동작할 경우 부하가 가변됨에 따라 스위칭 주파수를 가변 시켜 임계점에서 동작해야함으로 필터 설계가 어려워진다^[6]. 그리고 불연속 도통 모드로 동작하는 경우, 다이오드의 역 회복 영향 (reverse recovery effects: RRE)은 상당히 개선되지만 연속 도통 모드에 비해 평균 전류의 두 배 이상이 되는 입력 최대 전류가 요구되고 또한 도통 손실이 증가되는 단점을 가지게 된다. 이로 인해 고 전력 응용에 있어서 적합하지 못하는 단점을 가지고 있다. 마지막으로, 연속 도통 모드로 동작하는 경우, 소자의 이용률이 좋고, 낮은 도통 손실을 가지며, 입력 리플을 감소시킬 수 있어 고 전력 응용에 적합하나 하드스위칭으로 인한 스위칭 손실과 다이오드의 역 회복 영향이 증가하게 되는 문제점을 가지고 있다^[4]. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 현재 많은 연구가 이루어지고 있다^{[8]-[11]}. 그 중 커플드 인덕터 (coupled inductor)를 사용하여 RRE의 영향을 감소시키기 위한 IBC가 제안되었다^{[8]-[9]}. 그러나 커플드 인덕터 방식의 IBC는 비록 소프트 턴온이 이루어지지만 주 스위치의 기생 캐패시터에 의한 턴온 손실은 여전히 존재하게 된다. 뿐만 아니라 듀티비가 0.5이하로 제한되고, 또한, 고 전력 응용을 위해, 기존의 IBC에 비해 인덕터 설계에 있어서 상대적으로 구조적 제한성을 갖는다. 그럼으로, 본 논문에서는, 기존의 문제점을 개선하기 위해, 고 전력 응용에 유리한 CCM 방식에 대하여, 하나의 공진 인덕터를 사용하여 각 컨버터의 영전압 스위칭이 가능한 새로운 ZVT를 가지는 IBC를 제안한다. 제안된 IBC는 간단한 회로를 가지며, 추가적인 공진 인덕터 없이 단지 보조 스위치만 추가함으로써 컨버터의 용량 확장 시 ZVT 셀의 확장이 용이하다는 장점이 있다. 제안된 방식의 동작 원리와 제어 방식에 대해 자세히 설명하고 실험을 통하여 제안된 방식의 타당성을 검증하였다.

2. 제안된 IBC의 동작 원리

2.1 회로 구조 및 동작 원리

그림 1은 제안된 영전압 셀을 갖는 2개의 부스트 컨버터가 병렬로 구성된 IBC를 보여주고 있다. 그림1에

서 보듯이, 하나의 공진 인덕터 L_r 와 2개의 양방향 블록킹이 가능한 보조스위치 S_{A1} , S_{A2} 로 구성된 보조회로와 기존의 IBC로 구성된다. 회로의 해석을 간단하게 하기 위해 다음과 같이 가정을 한다.

- 1) 각 부스트 인덕터는 매우 커서 일정전류원이다.
- 2) 출력 캐패시턴스가 매우커서 일정 전압이다.
- 3) 컨버터는 연속 도통 모드에서 동작한다.

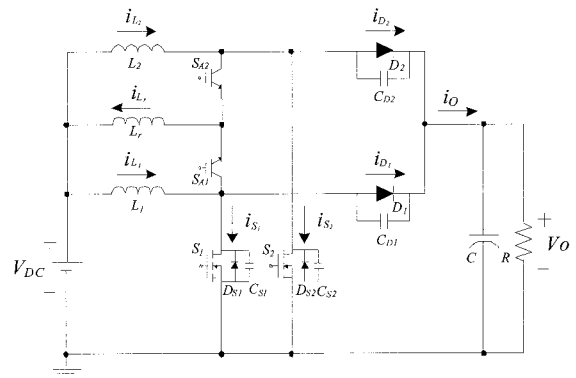


그림 1 제안된 영전압 셀을 가지는 IBC
Fig. 1 IBC with the proposed ZVT cell

그림 2와 3은 제안된 IBC의 이론적 출력 파형과 동작모드를 각각 보여 주고 있다. 그림에서 보듯이 제안된 ZVT를 가지는 IBC는 한주기 동안 14개가 존재한다. 각각의 동작모드는 다음과 같다.

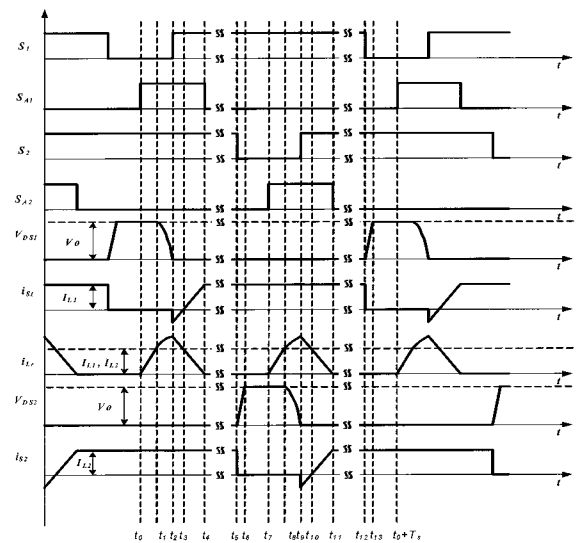


그림 2 이론적 출력 파형
Fig. 2 Main theoretical waveform of the IBC

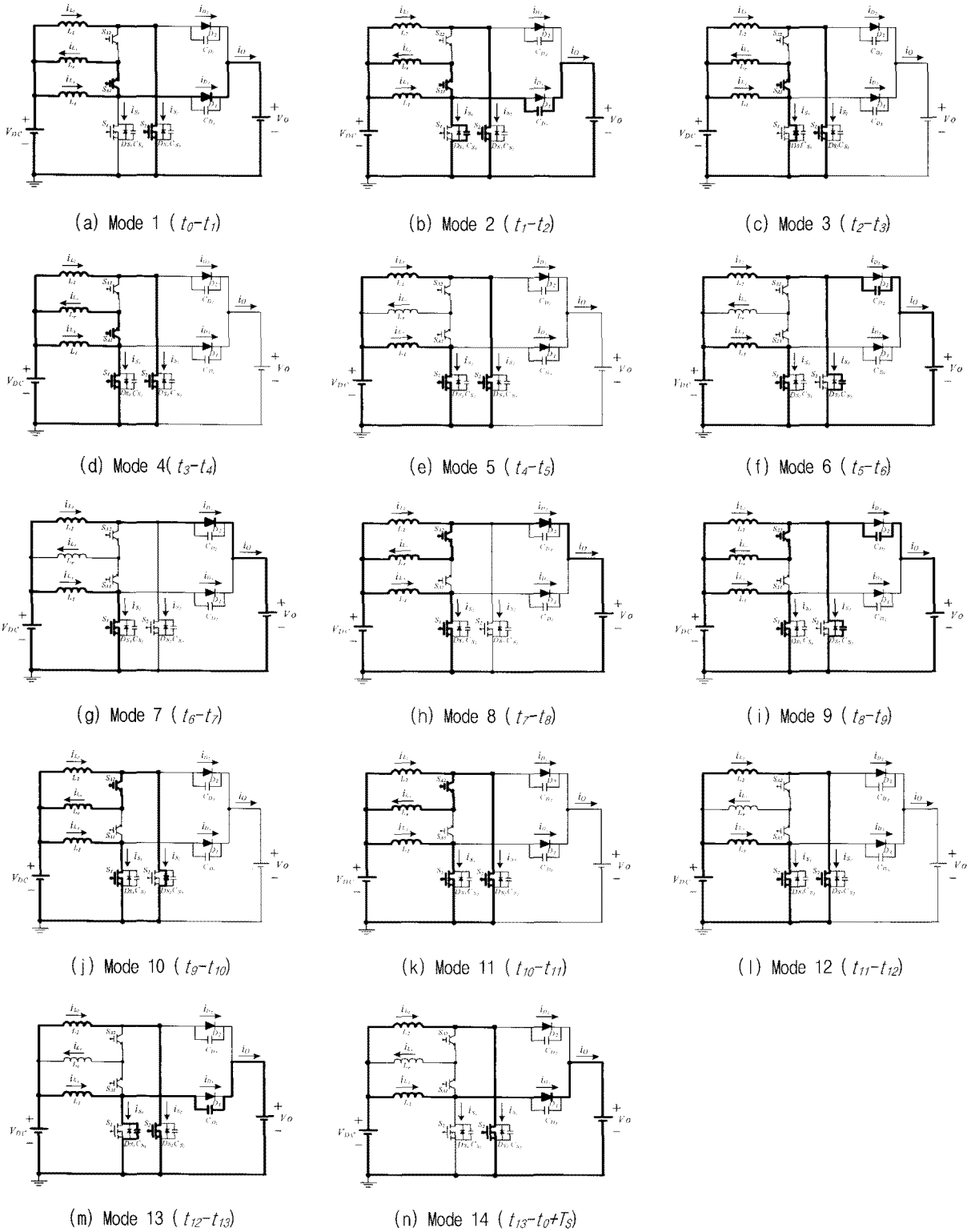


그림 3 동작 모드
Fig. 3 Operation mode of the IBC

(a) Mode 1(t_0-t_1)

t_0 이전에, 스위치 S_1 은 오프 상태이며, S_2 는 온 상태이다. 이때 L_1 에 저장된 에너지는 D_1 을 통하여 출력으로 전달되고, L_2 는 S_2 를 통하여 에너지가 저장되어진다. t_0 시점에서, 보조스위치 S_{A1} 을 턴-온 한다. 이때 공진 인덕터 전류, i_{Lr} ,은 $\frac{V_o-V_{DC}}{Lr}$ 로 I_{L1} 까지 선형적으로 상승 (ramps up)하게 된다. 이 구간 동안의 시간 간격은 다음과 같이 주어진다.

$$t_{0-1} = \frac{I_{L1}}{(V_o - V_{DC})/L_r} \quad (1)$$

(b) Mode 2(t_1-t_2)

t_1 시점에서, i_{Lr} 은 커패시터 C_{s1} 와 C_{D1} 의 에너지와 공진 인덕터 L_r 사이의 공진에 의해서 정현적으로 증가하며, S_1 의 기생커패시터 C_{s1} 과 다이오드 D_1 의 기생커패시턴스 C_{D1} 는 충·방전된다. 그리고 S_2 는 여전히 온 상태이다.

공진주기, t_1-t_2 , 은 식 2로 구해진다.

$$t_{1-2} = \frac{\pi}{2} \sqrt{L_r C_{r1}} \quad (2)$$

여기서, $C_{r1} = C_{s1} // C_{D1}$

(c) Mode 3(t_2-t_3)

t_2 에서, 스위치 S_1 의 전압은 영이 된다. 이때 S_1 의 역병렬 다이오드 D_{S1} 이 도통되며, $\frac{V_{DC}}{L_r}$ 의 비율로 공진 인덕터 전류는 I_{L1} 까지 선형적으로 감소한다. 이 구간 동안, 스위치 S_1 은 ZVS를 보장하기 위해 턴-온 되어 져야 한다.

이 구간 동안의 시간은 아래와 식 3과 같다.

$$t_{2-3} = \frac{(I_{Lr_peak} - I_{L1})L_r}{V_{DC}} \quad (3)$$

그리고 S_1 과 S_{A1} 과의 게이팅 신호 지연 시간은 아래의 부등식 4를 만족해야 한다.

$$T_{d1} \geq t_{0-1} + t_{1-2} = \frac{I_{L1}}{(V_o - V_{DC})/L_r} + \frac{\pi}{2} \sqrt{L_r C_{r1}}$$

$$T_{d1} \leq t_{0-1} + t_{1-2} + t_{2-3} = \frac{I_{L1}}{(V_o - V_{DC})/L_r} + \frac{\pi}{2} \sqrt{L_r C_{r1}} + \frac{(I_{Lr_peak} - I_{L1})L_r}{V_{DC}} \quad (4)$$

여기서, I_{Lr_peak} 는 공진 전류의 최대값이다.

(d) Mode 4(t_3-t_4)

공진 인덕터 전류와 스위치 S_1 전류는 앞 모드와 같은 비율로 선형적으로 각각 증가 및 감소한다. 이때, S_2 는 여전히 온 상태이다.

(e) Mode 5(t_4-t_5)

t_4 에서, 공진 인덕터 전류 i_{Lr} 은 영이 되며, 보조 스위치 S_{A1} 은 턴 오프 된다. 이 구간은 스위치 S_1 과 S_2 모두 턴-온 상태이며 기존의 IBC와 동일하게 L_1 , L_2 에 에너지가 저장된다. 또한, 공진 인덕터의 저장된 에너지가 영이 됨에 동시에 보조 스위치 S_{A1} 에 의해서 부스트 컨버터와 공진 셀이 분리된다.

보조스위치 S_{A1} 이 턴-오프 되기 위한 지연시간, T_{dSA1} ,은 아래의 식과 같다.

$$T_{dSA1} \geq t_{0-1} + t_{1-2} + t_{2-3} + t_{3-4} = \frac{I_{L1}}{(V_o - V_{DC})/L_r} + \frac{\pi}{2} \sqrt{L_r C_{r1}} + \frac{(I_{Lr_peak} - I_{L1})L_r}{V_{DC}} + \frac{I_{L1}L_r}{V_{DC}} \quad (5)$$

(f) Mode 6(t_5-t_6)

t_5 에서, 스위치 S_2 는 턴 오프 되고 C_{S2} 와 C_{D2} 는 V_0 와 0으로 각각 선형적으로 충·방전한다.

(g) Mode 7(t_6-t_7)

t_6 에서, 충·방전이 끝나고, 스위치 S_2 는 V_0 와 동일하게 된다. 이때 L_2 에 저장된 에너지는 부하로 전달하게 되고 L_1 은 스위치 S_1 을 통하여 에너지가 저장되며 이것은 기존의 IBC 동작과 동일하다.

이로써 반주기 동작 모드가 끝나고 나머지 반주기 동안의 동작 모드는 모드 1에서 모드 7의 동작 모드와 유사하게 동작하게 된다.

2.2 제어 회로

그림 4는 제안된 IBC의 타당성을 검증하기 위한 전체 제어 블록도를 보여준다. 그림 4에서보듯이, 전압 및 전류제어기는 PI 제어기로 쉽게 구현된다. 전압 제어기는 공통으로 사용되며 전류제어는 각각의 센싱된 전류에 의해서 이루어진다. 각 컨버터들은 서로의 위상이동을 통하여 180도 위상차를 가지면서 제어된다. 이때의 보조 신호들은 각각의 컨버터의 온 신호와 동기 되어 일정한 듀티와 위상차를 가지면서 출력된다.

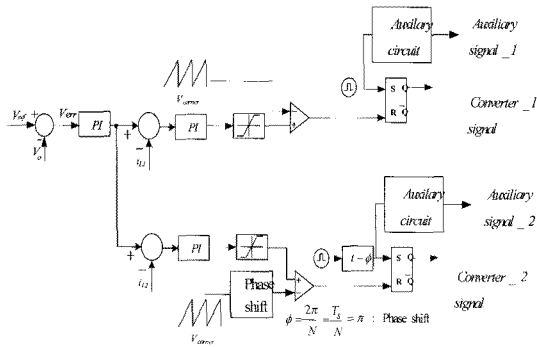


그림 4 제안된 IBC의 제어회로 블록도
Fig. 4 Control logic diagram for proposed IBC

3. 실험 결과

제안된 영전압 스위칭 기법의 타당성을 검증하기 위해 표 1의 조건하에서 실험을 수행하였다.

표 1 실험에 사용된 파라미터
Table 1 Parameters of the experimental setup

COMPONENTS		PARAMETERS
V_{DC}	입력 전압	14 V _{DC}
V_o	출력 전압	42 V _{DC}
P_o	정격 전력	200 W
f_s	스위칭 주파수	42 kHz
$L_{1,2}$	주 인덕터	47 μ H
L_r	공진 인덕터	0.8 μ H
$C_{r1,2}$	공진 커패시턴스	20 nF

그림 5는 실험을 수행하기 위한 IBC회로도 보여 준다. 사용된 전력용 반도체 소자의 구성은 다음과 같다. 기존의 하드 스위칭을 하는 IBC를 위해 주 스위치 $S_{1,2}$ 와 주 다이오드 $D_{1,2}$ 는 MOSFETs (FQP33N10) 와 ultrafast recovery diodes (RURG3020)를 사용하였다. 또한, 보조 스위치 $S_{A1,2}$ 는 MOSFETs (FQPF33N10)가 사용되었으며 보조 스위치의 역병렬 다이오드의 도통을 막기 위해 블로킹 다이오드 D_A (FES16BT)를 사용하였다.

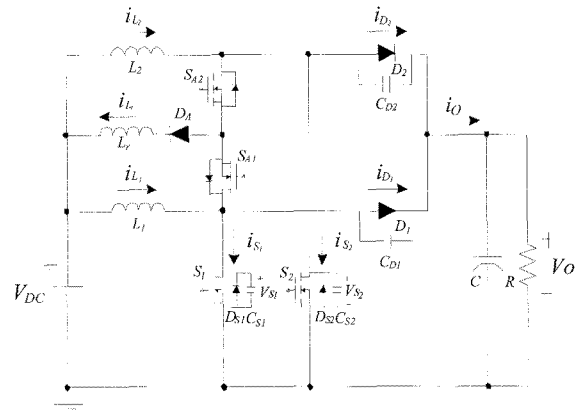
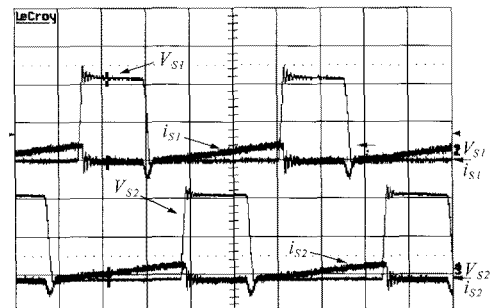


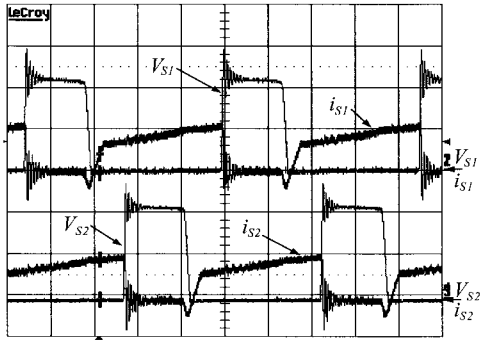
그림 5 제안된 IBC의 실제 회로도
Fig. 5 Circuit diagram of the experimental IBC with the proposed ZVT cell

그림 6과 7은 그림 5의 회로에 의해서 얻어진 실험 결과 파형을 보여 준다. 그림 5에서는 주 스위치 S_1, S_2 의 전압 및 전류 파형을 보여 준다. 그림에서 보듯이, 각 스위치의 전압 및 전류는 서로 180도의 위상차를 가지며 동작함을 알 수 있다. 그림 6(a)는 경 부하 조건하에서의 출력 파형을 나타낸다. 그림 6(a)에서 보듯이 단일 공진 인덕터에 의해서 스위치가 턴-온 시 영전압 스위칭이 이루어짐을 알 수 있다. 그림 6(b)는 정격 부하 조건하에서 출력 파형을 보여 준다. 경 부하일 경우와 마찬가지로 각각의 스위치는 영전압 스위칭이 안전하게 수행됨을 알 수 있다. 그림 7은 부하가 변 시 출력 전압과 스위치 전류를 보여 준다. 이때 부하가 변은 Magnetic Contactor (MC)를 사용하였다.

그림 7에서 보듯이 부하가 가변 (30%에서 100% 또는 100%에서 30%)이 되더라도 출력 전압과 전류는 약간의 과도 상태 후 일정하게 제어됨을 알 수 있다. 또한 각 스위치의 전류는 서로 평형하게 흐름을 보여 준다. 그럼으로, 위의 실험 결과들로부터 연속 도통 모드에서 스위치 턴-온 시 스위칭 손실과 다이오드의 역 회복 영향이 감소됨을 알 수 있다.

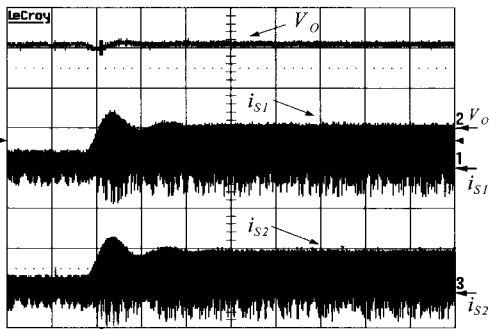


(a) 경 부하 시

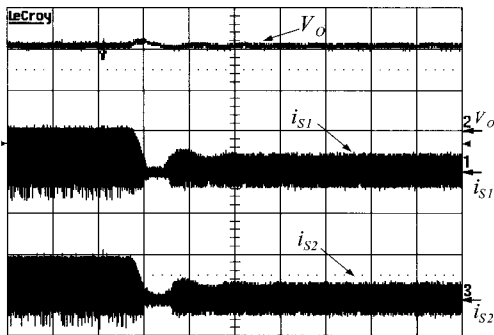


(b) 정격 부하 시
(20V/div., 10A/div., time: 5us)

그림 6 스위치 전압 및 전류 파형
Fig. 6 Waveforms of the switch currents and voltages



(a) 30%에서 100%로 부하 가변 시



(b) 100%에서 30%로 부하 가변 시
(20V/div., 10A/div., time: 5ms)

그림 7 부하 가변 시 출력 전압 및 전류 파형
Fig. 7 Switch currents and output voltage under load variation

그림 8은 하드 스위칭과 제안된 소프트 스위칭을 동일한 파라미터 조건하에서 부하에 따른 측정된 효율 곡선을 보여 준다. 보조스위치의 손실은 경부하일 경우

에는 보조 스위치에 전류가 거의 흐르지 않아 약간의 손실만 발생되며, 그러나 정격부하에서는 보조스위치의 손실은 약 0.6%, 메인스위치 및 다이오드의 손실은 기존하드 스위칭에 비해 약 4.1%정도 개선되었습니다. 따라서 그림 8에서 보듯이, 경부하일 경우에는 기존하드 스위칭과 비슷한지만 정격 부하인 경우에 대하여 약 3.5%개선됨을 확인할 수 있다.

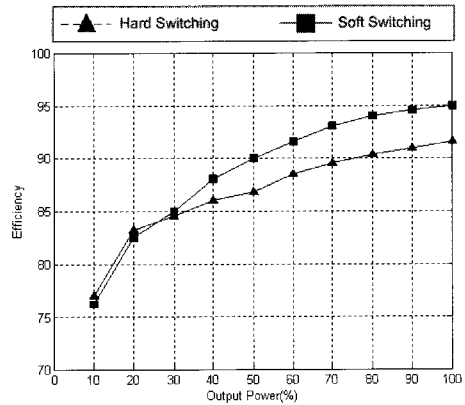


그림 8 측정된 효율
Fig. 8 Measurement efficiency

4. 결 론

본 논문에서는 연속 도통 모드에서 고 전력 응용에 유리한 단일 공진 인덕터를 가지는 IBC를 제안하였다. 또한, 제안된 IBC에 대해 이론적 해석을 하였으며, 제안된 방식의 타당성을 실험을 수행하여 입증하였다. 제안된 IBC는 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

- 단일 공진 인덕터로 인한 간단한 회로 구조.
- 영전압 스위칭을 위한 추가적인 공진 인덕터 불필요와 이로 인한 비용 및 사이즈 감소.
- 컨버터 용량 확장에 따른 ZVT셀 확장이 용이함.
- 고 전력 응용에 용이함.

참 고 문 헌

[1] Xunwei Zhou, Peng Xu, Lee F.C, "A Novel-Current Sharing Control Technique for Low-Voltage High Current Voltage Regulator Module Application", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 15, pp. 1153-1162, 2002, Nov.

[2] 손승찬, 박상은, 정민재, 성세진, "단일 전류센서를 이용한 마스터-슬레이브 전류 분배형 2개의 DC-DC 컨버 병

- 렬운전", *전력전자학회 논문지*, Vol. 5, No. 2, pp. 184-191, 2000. 4.
- [3] 민병선, 박남주, 현동석, "Interleaved 부스트 컨버터의 새로운 전류분배기법", *전력전자학회 논문지*, Vol. 12, No. 2, pp. 165-173, 2007. 4.
- [4] 장은성, 신희범, "불연속 전류모드에서의 다상 교호 강압 컨버터 특성해석", *전력전자학회 논문지*, Vol. 12, No. 2, pp. 123-130, 2007. 4.
- [5] Veerachary, M., Senjyu, T., Uezato, K., "Signal flow graph nonlinear modelling of interleaved converters", *IEE Proceedings, Electric Power Applications*, Vol. 148, No. 5, pp. 410-418, 2001, Sept.
- [6] C..A. Canesin, F.A.S. Goncalves, "A 2KW Interleaved ZCS-FM Boost Rectifier Digitally Controlled by FPGA Device", *IEEE Power Electronic Specialist Conference Record*, pp. 513-518, 2005.
- [7] Shin, H.-B., Park, J. G., Chung, S. K., Lee, H. W., Lipo, T.A., "Generalised steady-state analysis of multiphase interleaved boost converter with coupled inductors", *IEE Proceedings, Electric Power Applications*, Vol. 152, No. 3, pp. 584-594, 2005, May.
- [8] Po-Wa Lee, Yim-Shu Lee, Cheng, D.K.W., Xiu-Cheng Liu, "Steady-state analysis of an interleaved boost converter with coupled inductors", *IEEE Transactions on, Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 4, pp. 787-795, 2000, Aug.
- [9] Wei Wen, Yim-Shu Lee, Martin Hoi Lam Chow and David Ki-Wai Cheng, "Interleaved boost converter with zero diode reverse-recovery loss", *IEEE Transactions on, Aerospace and Electronic systems*, Vol. 40, No. 4, pp. 1271-1285, 2004, October.
- [10] Schuch, L., Rech, C., Pinheiro, H., Hey, H.L., Grundling, H.A., Pinheiro, J.R., "Integrated ZVT Auxiliary Commutation Circuit for Input Stage of Double-Conversion UPSs", *IEEE Transactions on Power Electronic*, Vol. 19, pp. 1486-1497, 2004, November.
- [11] Guichao, Hua., Ching-Shan Leu, Yimin Jiang, and Fred C. Y. Lee, "Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converter", *IEEE Transactions on Power Electronic*, Vol. 9, pp. 213-219, 1994, March.

저 자 소 개



박남주(朴南柱)

1973년 6월 22일생. 2001년 경상대 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2007년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2007년~2008년 7월 한양대 전기공학과 박사 후 과정. 2008년 8월~현재 삼성전자 생활가전사업부 책임연구원.



이동명(李東明)

1969년 8월 25일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 졸업(석사). 2004년 조지아공대전기 및 컴퓨터공학과 졸업(공학박). 1996년~2000년 LG전자 주임연구원. 2004년~2007년 삼성 SDI 책임연구원. 2007년~2008년 한양대 BK21 연구교수. 2008년~현재 홍익대 전자전기공학부 조교수.



하동현(河東鉉)

1960년 5월 13일생. 1995년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 한양대 대학원(공학박). 1992년~1997년 현대정공(주) 기술연구소. 1998년~2003년 현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원. 2004년~현재 현대로템(주) 기술연구소 책임연구원.



현동석(玄東石)

1950년 4월 8일생. 1973년 한양대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1984년~1985년 미국 토레도대학 교환교수. 1988년~1989년 원혜공과대학 교환교수. 2003년 IEEE, Fellow Member. 1979년~현재 한양대 전기제어생체공학부 교수. 2000년 당 학회 회장 역임.