

부분공진 기법이 적용된 ZVCS DC-DC 초퍼에 관한 연구

곽동걸*

강원대학교 방재기술전문대학원

A Study on ZVCS DC-DC Chopper by using Partial Resonant Method

Dong-Kurl Kwak*

Graduate School of Disaster Prevention Technology, Kangwon University
1 JoongAng-ro, Samcheok-si, Gangwon-do, Korea, 245-711

초 록: 최근 DC-DC 초퍼의 소형경량화 및 저소음화를 위해서 초퍼에 사용한 전력용 반도체 스위치의 스위칭 주파수를 증대시키고 있다. 이에 따른 스위칭 손실의 증대는 초퍼의 효율을 상당히 감소시키는 요인으로 주어진다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 초퍼에 사용한 반도체 스위치의 턴-온, 턴-오프를 소프트 스위칭(영전류 또는 영전압 스위칭)으로 동작시켜 스위칭 손실을 최소화하는 새로운 고효율의 DC-DC 초퍼를 제안한다. 제안한 초퍼의 소프트 스위칭 동작은 스위치의 동작 시점에 부분공진 회로가 형성되어 인덕터의 전류와 커패시터의 전압이 영으로 될 때 스위치를 동작시키는 부분공진 기법이 적용된다. 또한 제안한 초퍼에 적용된 부분공진 회로는 승압용으로 사용한 인덕터와 스너버 커패시터에 의해 설계되어 초퍼의 회로 토폴로지가 간단하다. 컴퓨터 시뮬레이션과 실험결과를 통해 제안한 DC-DC 초퍼의 타당성이 입증된다.

Abstract: Recently, DC-DC choppers must be increased switching frequency in order to achieve a small size, a light weight and a low noise. However, the switches of chopper are subjected to high switching power losses and switching stresses. As a result of these, the chopper system bring on a low power efficiency. To improved these, this paper is studied on a new DC-DC chopper of high efficiency operated with soft switching(that is, zero current switching and zere voltage switching, ZVCS),of semiconductor switches using in chopper. The soft switching operation is applied to a partial resonant method that the switches operate at zero current of inductor and zero voltage of capacitor in resonant circuit. And the partial resonant circuit makes use of a inductor using step-up and a snubber capacitor, the circuit topology of chopper is simple. Some simulative results on computer and experimental results confirm the validity of analytical results of the DC-DC chopper.

Keywords: DC-DC chopper, Partial resonant method, Soft switching, ZVCS, High efficiency

1. 서 론

각종 전기, 전자기기 및 통신기기 등의 입력단에는 직류전원 공급장치가 내장되어 있다. 또한 최근 신재생 에너지개발에 따른 태양전지나 연료

전지 발전시스템은 직류전압을 공급하고 있으며, 이 직류전압은 부하가 요구하는 전압으로 승압(step-up)되어 공급된다.^{1,2)} 이러한 직류전원 장치들은 출력을 최대로 활용하기위해 고효율의 SMPS(Switching Mode Power Supply) 즉, 고효율

*Corresponding author
E-mail: dkkwak@kangwon.ac.kr

DC-DC 초퍼가 요구된다. 현재 많이 사용되는 승압용 DC-DC 초퍼는 Fig. 1과 같이 에너지 축적용 인덕터 L 와 단락용 제어스위치 S 를 이용하여 스위치의 PWM 제어에 의해 구현된다. 이러한 스위치 모드 전력변환기들은 스위칭 주파수를 높임으로써 변환기의 소형화, 경량화 그리고 저잡음화를 성취하였다.^{3,4)} 그러나 이들 전력변환기에 사용된 스위치들은 높은 스위칭 주파수에 의해 스위칭 손실이 크며 많은 스트레스를 받게 되어 변환기의 효율을 현저히 감소시킨다. 또한 전력변환기들은 스위치를 보호하기 위해서 Fig. 1과 같이 스위치 주변에 스너버(snubber)회로를 이용하여 보완하지만 출력전류가 증가할 경우 스너버 손실이 크게 되어 변환기의 효율을 더욱 감소시킨다.

이들을 개선하기 위하여 스위치의 턴-온과 턴-오프 동작을 소프트 스위칭 즉, 영전압 스위칭(ZVS) 또는 영전류 스위칭(ZCS)으로 만들어 스위칭 손실 및 스너버 손실을 감소시키는 회로 토폴로지들이 많이 연구되고 있다.⁵⁾ 이들 소프트 스위칭 회로들은 변환기의 스위치 단에 다양한 공진회로 기법들을 적용시킨 것으로써, 이들 회로들의 일반적인 문제점으로는 변환기 내에 사용된 스위치 수의 증가로 인한 스위칭 시퀀스가 복잡하고 출력전류를 증가시킬 경우 지속적인 공진에 의한 공진소자들의 손실과 스트레스가 증가되는 문제점이 발생한다.^{6,7)} 본 논문에서는 소프트 스위칭을 위한 공진회로부의 구조와 스위칭 제어기법이 간단한 새로운 부분공진회로 토폴로지를 개발하여 적용시킨 고효율의 DC-DC 초퍼를 제안한다. 제안한 초퍼의 부분공진회로는 기존의 초퍼에 사용되는 스너버 회로를 공진회로로 변형 설계한 새로운 회로구조로써 회로구성이 간단하며 부분공진으로

인한 공진용 소자들의 손실과 스트레스를 감소시키고,⁸⁾ 또한 부분공진용으로 이용된 커패시터는 기존의 스너버용 커패시터와 달리 무손실로 동작되고 사용된 제어 스위치들의 소프트 스위칭에 의한 초퍼의 효율을 증대시킨다.

2. 부분공진 기법이 적용된 ZVCS DC-DC 초퍼

2.1 제안한 초퍼의 회로구성

제안한 부분공진 기법이 적용된 ZVCS DC-DC 초퍼의 주회로도를 Fig. 2에 나타낸다. 회로구성은 승압용 제어스위치 S_1, S_2 와 소프트 스위칭을 위한 부분공진용 소자 L_r 과 C_r 그리고 주변소자들로 구성된다.

부분공진 회로부는 기존의 전력변환기들에 사용되는 스너버 회로를 변형 설계한 구조로써 무손실 스너버로 동작된다. 스위치 S_1, S_2 의 동작을 살펴보면, 스위치 턴-온은 인덕터 L_r 의 전류가 불연속적으로 제어되므로 영전류 스위칭으로 되고, 턴-오프는 부분공진회로의 동작에 의한 커패시터 C_r 의 전압이 영으로 될 때 동작되어 영전압 스위칭으로 된다. 또한 제안한 DC-DC 초퍼는 PWM 스위칭제어에 의해 출력전압이 조정되고 승압용 인덕터에 흐르는 전류는 불연속모드로 제어된다.^{8,9)} 그 결과 제안한 초퍼는 소프트 스위칭에 의해 고효율로 동작되고 전류 불연속모드 제어에 의한 제어기법과 제어회로가 간단한 장점이 주어진다.

2.2 제안한 초퍼의 동작원리

Fig. 3 (a)~(d)는 스위칭 1주기(T_c)에 대한 각 동작모드별 등가회로를 나타내고 있으며 4가지 동

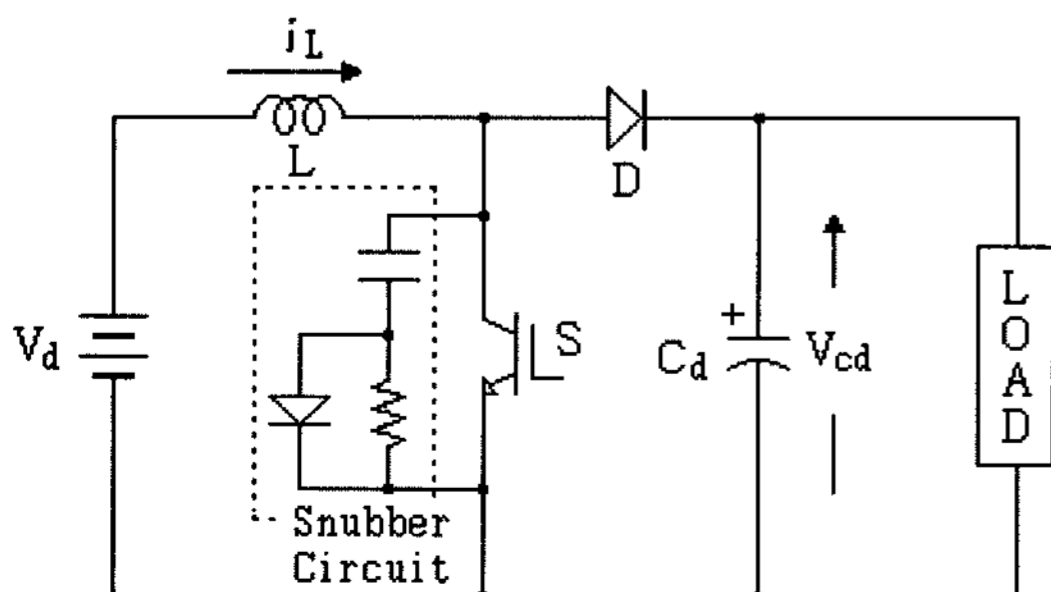


Fig. 1. A conventional step-up DC-DC chopper.

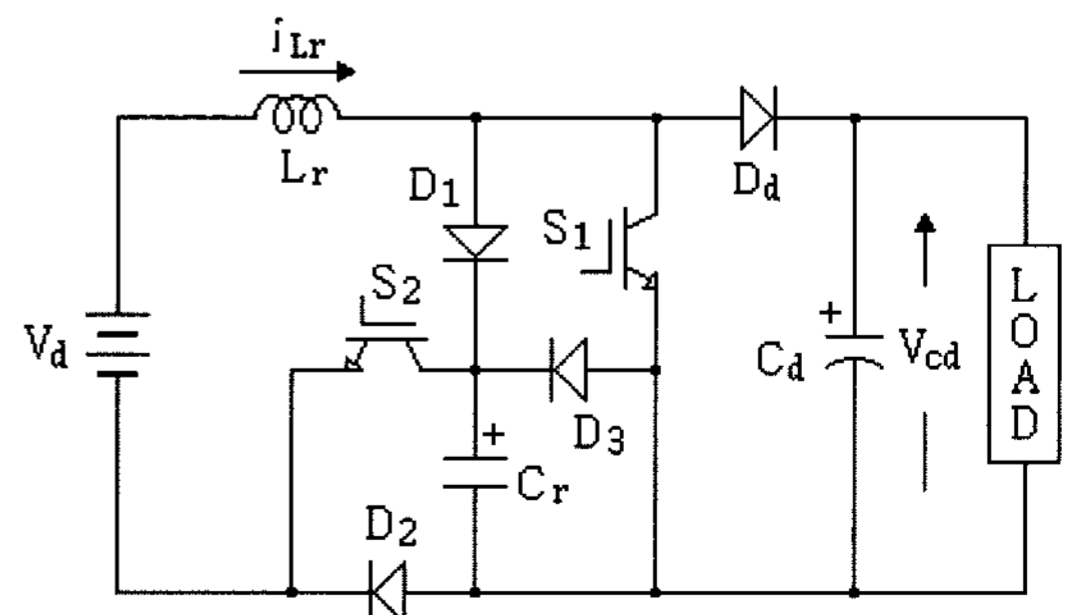


Fig. 2. A proposed ZVCS DC-DC chopper.

작모드로 구분된다. 출력 부하측 인덕턴스가 공진 용 인덕턴스와 비교하여 충분히 큰 것으로 가정하면, 공진 1주기 동안에는 부하를 정전류원 I_o 로 볼 수 있다. 부분공진회로부의 초기조건으로 스위치 S_1, S_2 는 오프, 커패시터 C_r 에는 출력측 커패시터 C_d 의 전압로 충전되어 있다.

Mode 1 ($T_1=t_1-t_0$)

시각 t_0 에서 스위치 S_1 과 S_2 를 동시에 턴-온하면, 회로 경로는 $V_d-L_r-S_1-C_r-S_2-V_d$ 의 직렬공진 회로가 형성된다. 스위치 턴-온 직전의 인덕터 L_r 에 흐르는 전류 i_{Lr} 는 영이므로 S_1, S_2 는 ZCS로 동작을 한다. 그리고 전원전압 V_d 와 커패시터의 충전전압 $V_{cr}(=$ 출력전압 $V_{cd})$ 와의 합이 인덕터 L_r 에 인가되어 L_r 와 커패시터 C_r 는 직렬공진을 하고 C_r 가 방전한다. 공진 인덕터의 저항을 무시하면, 커패시터의 전압 v_{cr} 는 식 (1)과 같이 방전하고 인덕터 L_r 에 흐르는 전류 i_{Lr} 는 식 (2)와 같이 증가한다. 커패시터 전압 v_{cr} 이 영으로 되면 Mode 1은 끝나며, 식 (3)은 이 모드의 기간이고 식 (4)는 이 모드가 끝나는 시점의 인덕터 전류이다.

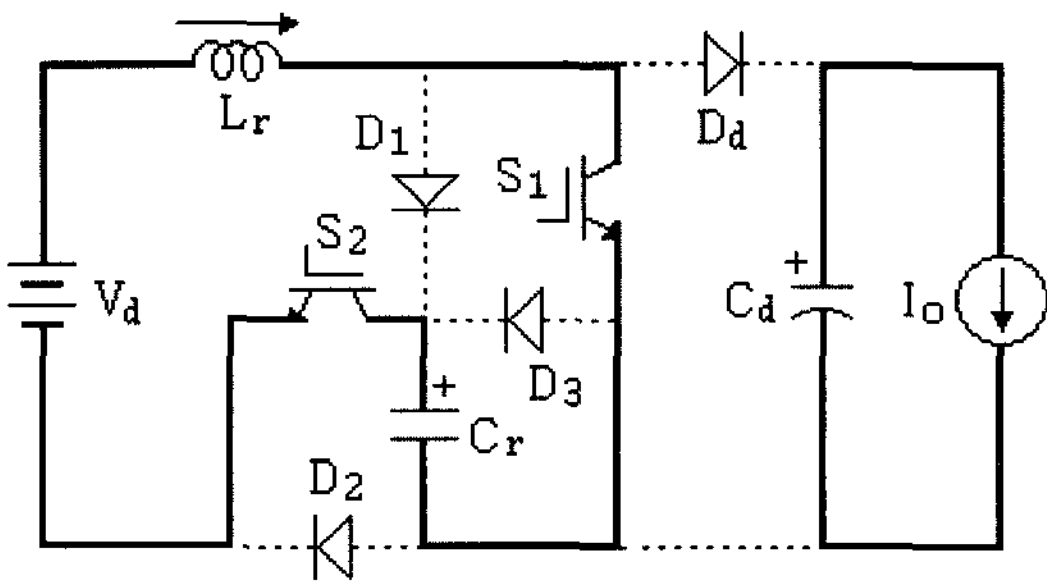


Fig. 3(a). Mode 1

$$v_{cr} = (V_d + V_{cd})\cos\omega_r t - V_d \tag{1}$$

$$i_{Lr} = \frac{V_d + V_{cd}}{X}\sin\omega_r t \tag{2}$$

$$T_1 = \sqrt{L_r C_r}\cos^{-1}\left(\frac{V_d}{V_d + V_{cd}}\right) \tag{3}$$

$$I_1 = \frac{1}{X}\sqrt{V_{cd}^2 + 2V_d V_{cd}} \tag{4}$$

여기서, $\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$, $X = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$ 이다.

Mode 2 ($T_2=t_2-t_1$)

Mode 2는 커패시터 전압 v_{cr} 이 영으로 되어 다이오드 D_3 이 도통되는 모드이다. 제어스위치들에 의한 단락회로가 형성되어 인덕터 L_r 의 전류는 $L_r-S_1-D_3-S_2$ 로 흐른다. 이 모드의 기간에서 인덕터 L_r 는 에너지를 축적한다. 이 때의 인덕터 전류 i_{Lr} 는 식 (5)와 같이 직선적으로 증가한다. T_2 는 스위치 S_1, S_2 를 오프하기까지의 시간으로 식 (6)과 같다. 식 (7)은 이 모드가 끝나는 시점의 인덕터 전류이다.

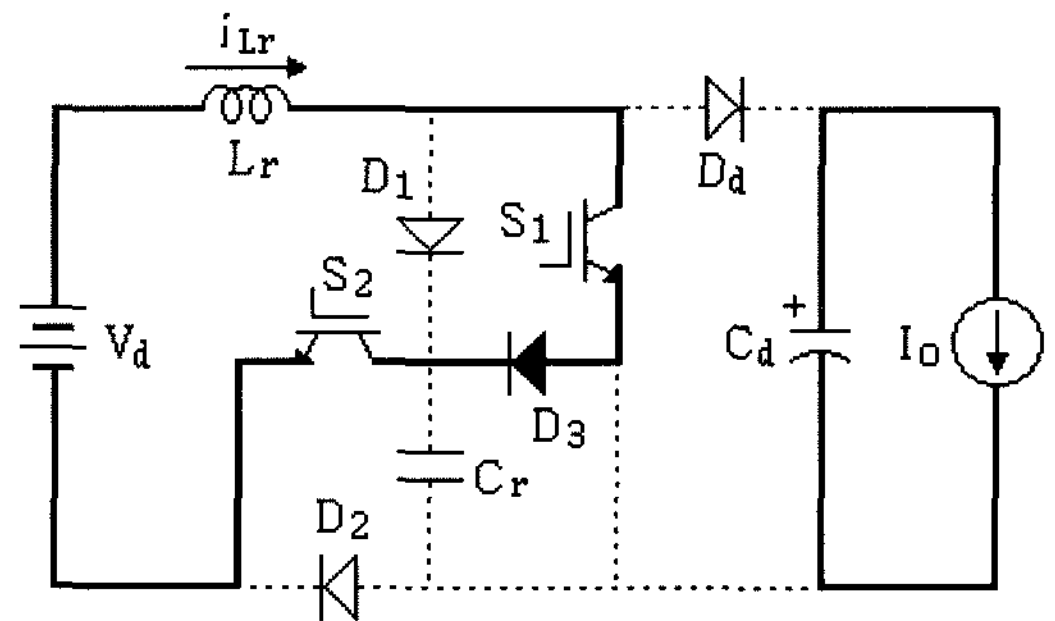


Fig. 3(b). Mode 2

$$i_{Lr} = \frac{V_d}{L_r}t + I_1 \tag{5}$$

$$T_2 = T_{on} - T_1 \tag{6}$$

$$I_2 = \frac{V_d}{L_r}T_2 + I_1 \tag{7}$$

Mode 3 ($T_3=t_3-t_2$)

시각 t_2 에서 스위치 S_1, S_2 를 오프하면, 인덕터 L_r 의 전류 i_{Lr} 는 $D_1-C_r-D_2$ 를 통하여 흐르고 인덕터 L_r 와 커패시터 C_r 는 다시 직렬공진을 하여 C_r 를 충전시킨다. 커패시터 C_r 와 병렬로 배치된 스위치들의 턴-오프 동작은 공진 초기에서 커패시터 C_r 의 전압이 영이므로 ZVS로 동작된다. 이 모드에서의 커패시터 전압 v_{cr} 은 식 (8)과 같으며, 인덕터에 흐르는 전류 i_{Lr} 는 식 (9)와 같다. 커패시터 전압 v_{cr} 이 출력전압 v_{cd} 로 될 때 이 모드는 끝나며, 이 모드의 기간 T_3 은 식 (10)에 주어지고 인덕터의 최종전류는 식 (11)과 같다.

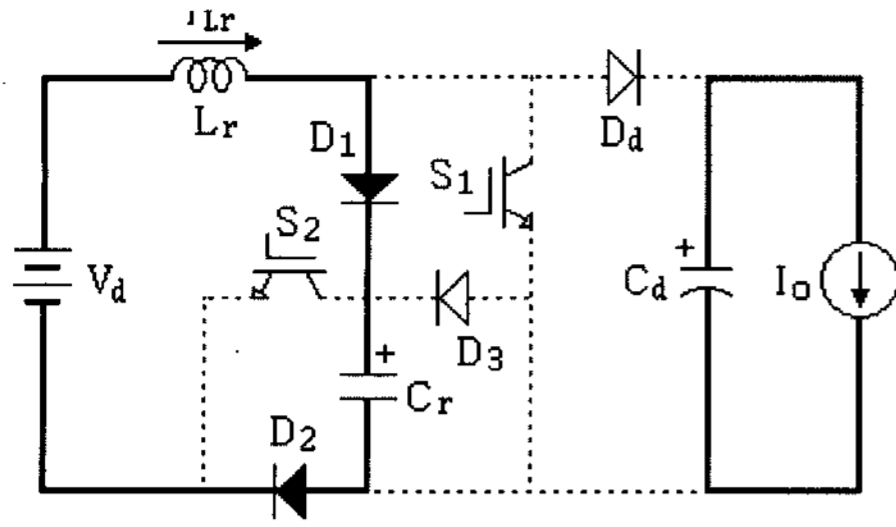


Fig. 3(c). Mode 3

$$v_{cr} = V_d + \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} I_a \sin(\omega_r t + \theta) \quad (8)$$

$$i_{Lr} = I_a \cos(\omega_r t + \theta) \quad (9)$$

$$T_3 = \sqrt{L_r C_r} \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{V_{cd} - V_d}{\sqrt{V_d^2 + \frac{L_r}{C_r} I_2^2}} \right) - \theta \right\} \quad (10)$$

$$I_3 = I_2 \cos \omega_r T_3 + \sqrt{\frac{C_r}{L_r}} V_d \sin \omega_r T_3 \quad (11)$$

여기서,

$$I_a = \sqrt{\frac{C_r}{L_r} V_d^2 + I_2^2}, \quad \theta = \sin^{-1} \left(-\frac{V_d}{\sqrt{V_d^2 + \frac{L_r}{C_r} I_2^2}} \right) \text{이다.}$$

Mode 4 ($T_4=t_4-t_3$)

Mode 4는 커패시터 C_r 의 충전이 끝난 후 다이오드 D_d 를 통하여 인덕터 L_r 의 전류가 부하측으로 유입되는 모드이다. 이 때의 인덕터 전류 i_{Lr} 는 직선적으로 감소하며 인덕터 전류가 영으로 되면 이 모드는 끝난다. 이 모드에서 인덕터 전류 i_{Lr} 는 식 (12)와 같고 이 모드의 기간 T_4 는 식 (13)과 같다.

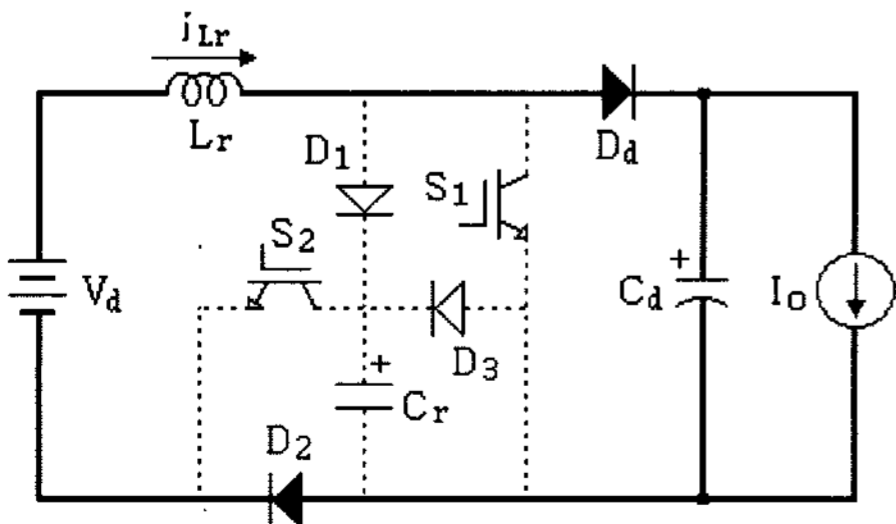


Fig. 3(d). Mode 4

Fig. 3. Equivalent circuits for operation modes.

$$i_{Lr} = \frac{V_d - V_{cd}}{L_r} t + I_3 \quad (12)$$

$$T_4 = \frac{L_r}{V_{cd} - V_d} I_3 \quad (13)$$

3. 시뮬레이션 및 실험결과

제안한 ZVCS DC-DC 초퍼의 동작특성을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션(PSpice)과 실험을 통한 실측분석을 하였다. 제안한 초퍼의 실측분석에 사용된 회로정수들을 Table 1에 나타낸다.

제안한 DC-DC 초퍼의 스위칭 동작에 대한 각 부의 시뮬레이션 파형을 Fig. 4에 나타낸다. Fig. 4에는 공진회로의 인덕터 전류 i_{Lr} 와 커패시터 전압

Table 1. Circuit parameters

입력전압 V_d	100V
출력전압 V_{cd}	300V
공진 인덕터 L_r	50 μ H
공진 커패시터 C_r	40nF
평활용 커패시터 C_d	1000 μ F
부하저항 R_L	100 Ω
스위칭 주파수 f_c	40kHz
듀티율 $D_c(T_{on}/T_c)$	30%

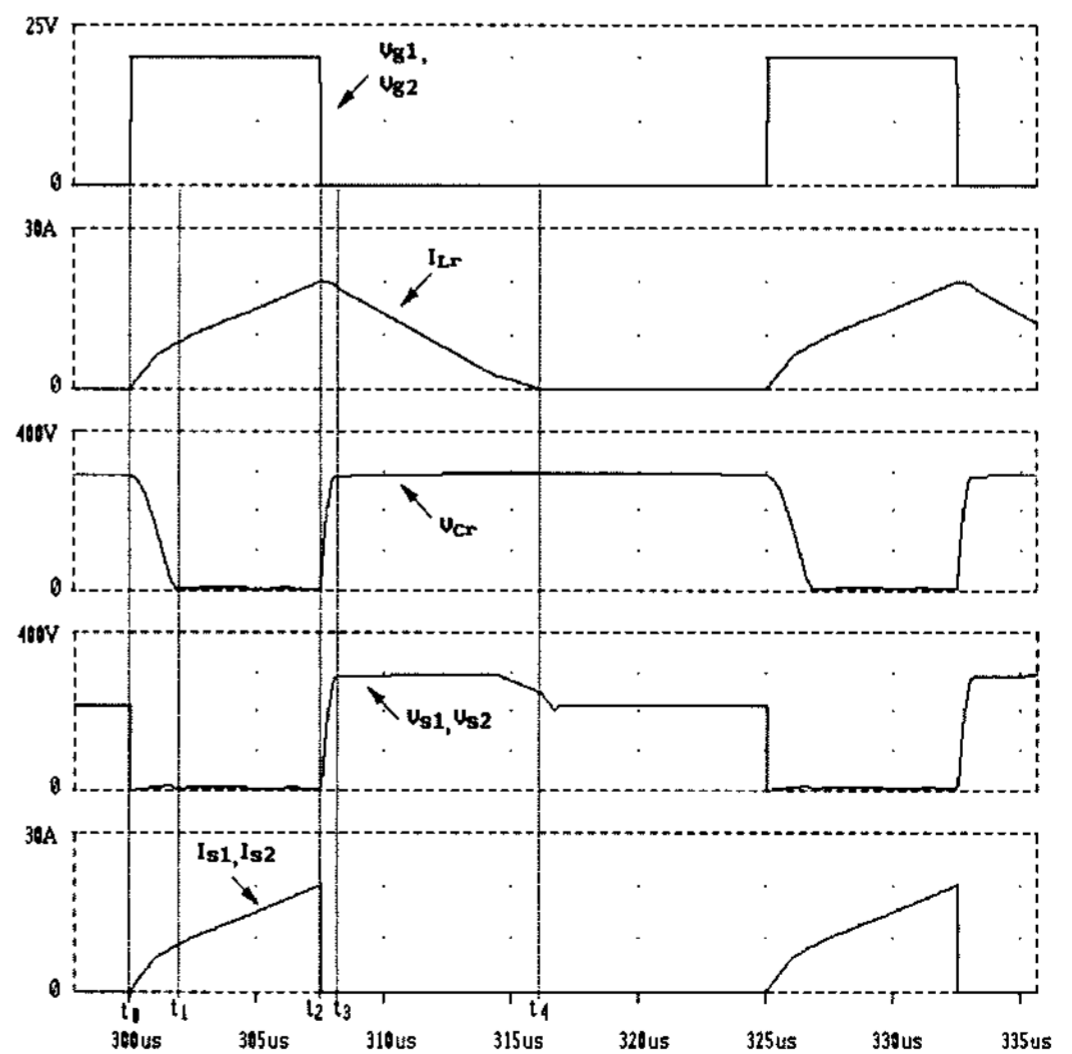


Fig. 4. Simulation waveforms in switching cycle.

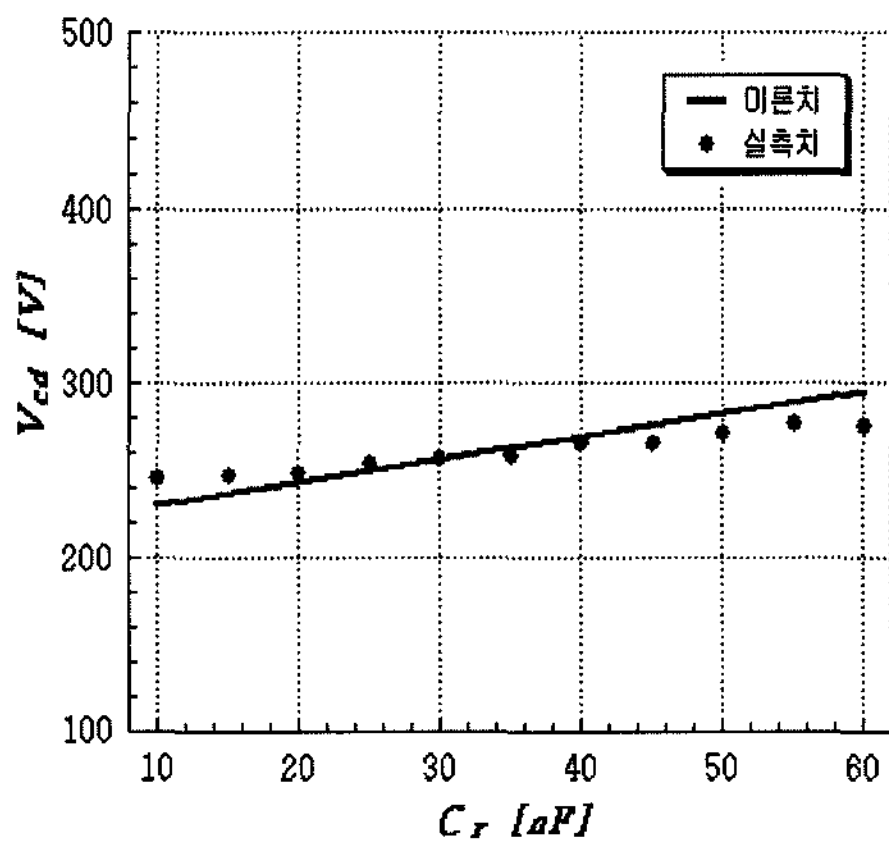
v_{cr} 그리고 제어스위치의 양단전압 v_{s1} , v_{s2} 와 전류 i_{s1} , i_{s2} 동작파형을 스위칭 동작에 대해 각 모드별로 나타낸다.

시뮬레이션 실측분석에서, 시각 t_0 에서 스위치 S_1 , S_2 를 턴-온하면 LC 직렬 공진회로에 의한 커패시터 C_r 가 방전을 시작하고 인덕터 L_r 는 에너지를 축적하게 된다. 이 시점에서의 스위치 S_1 , S_2 를 흐르는 전류 i_s 는 인덕터 전류 i_{Lr} 와 같고 스위치들은 ZCS로 동작된다. 시각 t_1 에서 커패시터 전압가 영으로 되면 제어스위치들에 의한 단락회로가 형성되어 인덕터 L_r 의 전류는 직선적으로 증가하며 에너지를 축적한다. 시각 t_2 에서 스위치를 오프하면 다시 LC 직렬 공진회로에 의한 커패시터 C_r 가 충전 시작한다. 그리고 이 시점에서의 스위치 S_1 ,

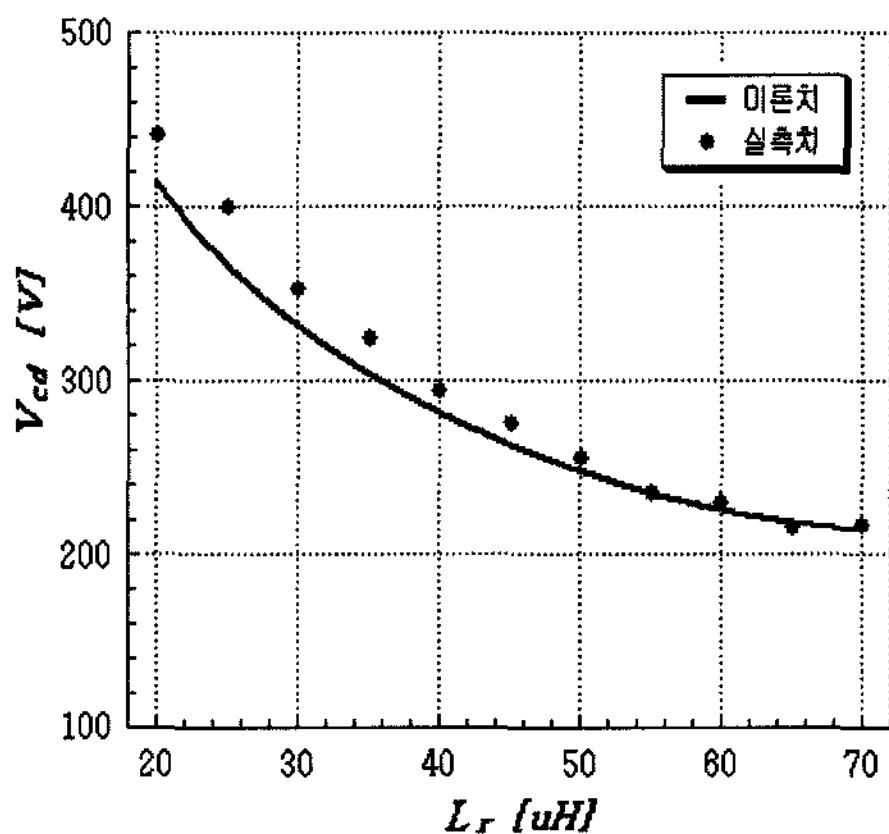
S_2 양단전압은 커패시터 전압 v_{cr} 와 같고 스위치들은 ZVS로 동작한다. 시각 t_3 에서 커패시터 전압은 출력전압로 되고 인덕터 전류 i_{Lr} 는 부하측으로 유입되어 직선적으로 감소하여 시각 t_4 에서 영으로 된다. 이들 시뮬레이션 결과파형들은 앞서의 이론적 해석들과 잘 일치함을 알 수 있다.

공진용으로 이용된 스너버 커패시터 C_r 의 용량 변화에 대한 출력전압 V_{cd} 의 변화를 Fig. 5(a)에 나타내며 승압용으로 이용된 공진 인덕터 L_r 의 용량 변화에 대한 출력전압 V_{cd} 의 변화를 Fig. 5(b)에 나타낸다. 이들 결과에서 출력전압은 공진용 커패시터의 용량변화에는 거의 변화가 없으나 공진용 인덕터의 변화에는 크게 변화된 모습을 보인다.

실험회로 구성은 전력용량 1kW급, DC100V의 입력전압에 DC300V의 출력전압으로 설계하였으며, 제어용 스위치는 IGBT(1MBH40-60, 600V, 40 A), 전력용 다이오드는 FRD(ERD60-100)를 채택하였고 기타 소자들의 정수는 Table 1을 기준하였다.

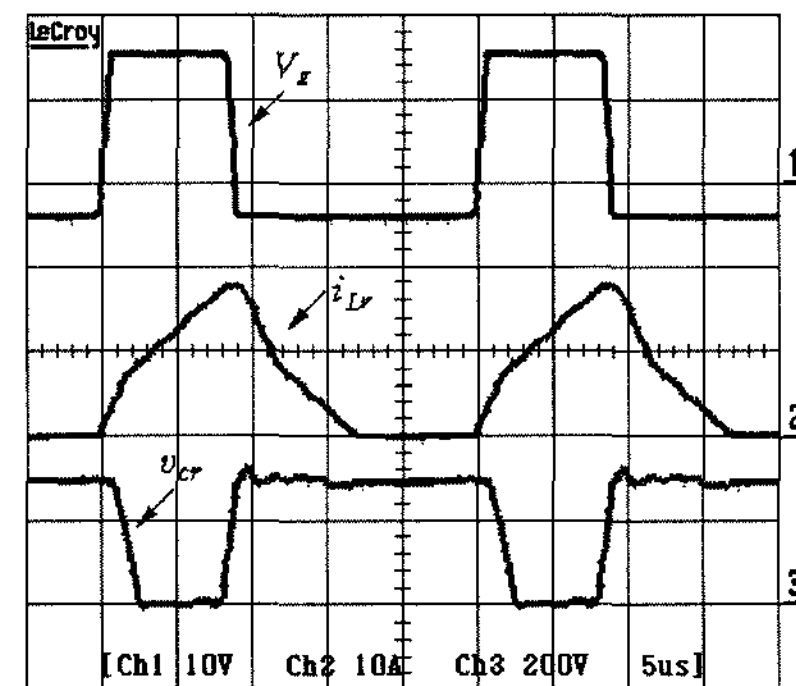


(a) Variation curve of C_r and V_{cd}

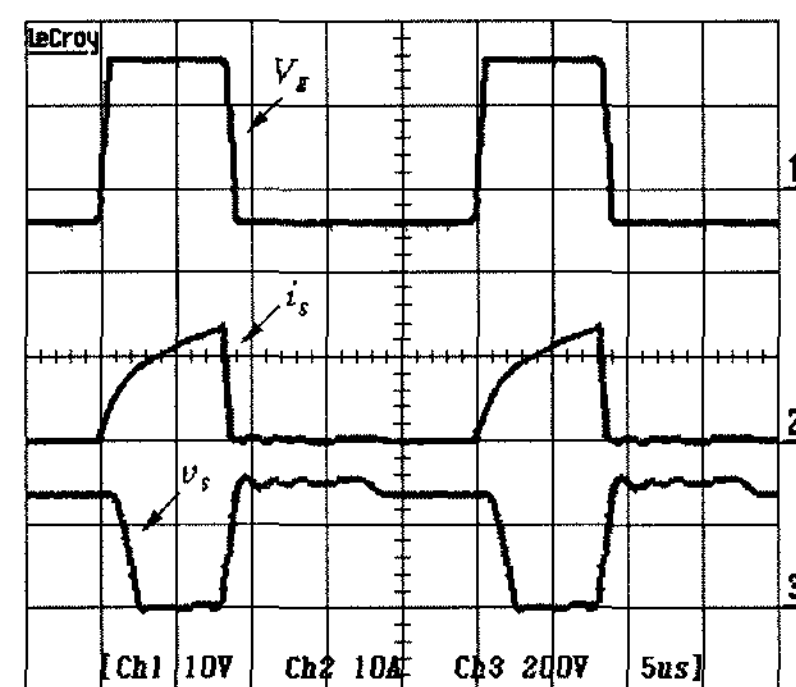


(b) Variation curve of L_r and V_{cd}

Fig. 5. Relationship between resonant devices and V_{cd} .



(a) Inductor current i_{Lr} and capacitor voltage v_{cr}



(b) Switch current i_s and switch cross voltage v_s

Fig. 6. Waveforms of each part for switching signal V_g .

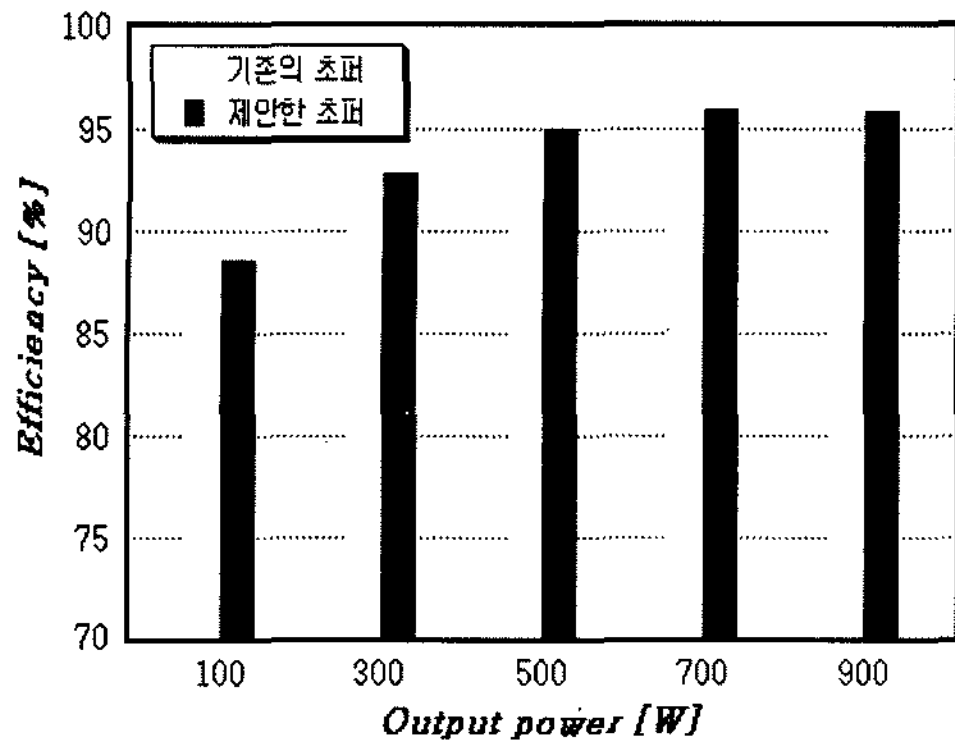


Fig. 7. Measured efficiency comparison.

Fig. 6은 스위칭 주파수 40[kHz], 듀티율 30[%]의 스위칭 신호에 대한 인덕터 전류 i_L , 커패시터 전압 v_C , 스위치에 흐르는 전류 i_s 와 스위치 양단전압 v_s 를 나타낸다. 공진회로는 공진 1주기 동안 지속적으로 이뤄지지 않고 스위치의 턴-온과 턴-오프 때에 부분적인 공진동작을 보인다. 이러한 동작에 의해 공진소자들의 용량분담과 스트레스를 줄이고 출력전류가 증가할 경우 공진손실을 감소시킬 수 있다. 그리고 제어스위치들은 부분공진에 의해 영전류에서 턴-온되며, 영전압에서 턴-오프되는 소프트 스위칭 동작을 보인다. 이상의 실험파형들은 스위칭 주파수 40[kHz], 듀티율 30[%]에 대한 앞서의 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 잘 일치하였다.

Fig. 7은 듀티율 30[%]에서 부하용량 변화에 따른 기존의 DC-DC 초퍼[Fig. 1]과 제안한 DC-DC 초퍼의 효율측정 비교를 나타낸다. 제안한 DC-DC 초퍼는 부분공진의 기법에 의해 스위칭 손실이 현저히 감소되어 기존의 DC-DC 초퍼에 비해 증대된 효율을 보였다.

4. 결 론

본 논문에서는 부분공진 기법이 적용된 새로운 ZVCS DC-DC 초퍼를 제안하여 기존의 DC-DC 초퍼와 비교 검토하였다. 제안한 초퍼는 부분공진 기법이 적용된 새로운 소프트 스위칭 회로로 동작하여 스위칭 손실이 저감되었으며 그 결과 기존의 DC-DC 초퍼와 비교하여 높은 효율을 가졌다. 제안한 DC-DC 초퍼의 부분공진 회로부는 구조적으로 기존의 초퍼에 사용되는 승압용 인덕터와 스너

버 커패시터를 변형 설계한 구조로써 회로구조가 간단하였다. 또한 부분공진으로 인한 공진용 소자들의 손실과 스트레스를 감소시켰으며, 출력전압은 제어스위치의 PWM 제어에 의해 조정되고 에너지 축적용 인덕터에 흐르는 전류는 불연속모드로 제어되어 제어회로와 제어기법이 간단해지는 장점을 가져왔다. 제안한 ZVCS DC-DC 초퍼를 AC-DC 컨버터에 적용할 경우, 스위치의 듀티율 일정제어에 의한 입력전류가 입력 교류전압의 크기에 비례한 정현 펄스파형으로 되어 컨버터의 역할개선 효과가 기대된다.

참고문헌

1. K-A. Adamson, "Calculating the Price Trajectory of Adoption of Fuel Cell Vehicles", International Journal of Hydrogen Energy 30, 341-350(2005).
2. E. R. C. Silva, M. C. Cavalcanti, and C. B. Jacobina, "Comparative Study of Pulsed DC-Link Voltage Converters", IEEE Trans. on PE, Vol.18, No. 4, 1028-1033(2003).
3. O. Garcia, J.A. Cobos, R. Prieto, P.Alou and J. Uceda, "Single phase power factor correction: A survey", IEEE Trans. on PE, Vol. 18, No. 3, 749-755 (2003).
4. Q. Zhao, M. Xu, F. C. Lee, and J. Qian, "Single-Switch Parallel Power Factor Correction AC-DC Converters with Inherent Load Current Feedback", IEEE Trans. on PE, Vol. 19, No.4, 928-936(2004).
5. I. Barbi, R. Gules, R. Redl and N. O. Sokal, "DC-DC Converter: 4 Switch $V_{pk}=V_{in}/2$, Capacitive Turn-Off Snubbing, ZV Turn-On", IEEE Trans. on PE, Vol. 19, No. 4, 918-927(2004).
6. D. Sadarnac, W. Abida, "The double discontinuous mode operation of a converter:A method for soft switching", IEEE Trans.on PE, Vol. 19, No.2, 453-460(2004).
7. X. Ruan, Z. Chen, and W. Chen, "Zero-Voltage-Switching PWM Hybrid Full-Bridge Three-Level Converter", IEEE Trans. on PE, Vol. 20, No. 2, 395-404(2005).
8. D.K.Kwak, C.S.Kim, J.S.Shim, C.S.Kim, and H. W.Lee, "A Novel Step-up AC-DC Converter with PFC by Discontinuous Current Control", Journal of KIPE, Vol. 11, No. 2, 142-148(2006).
9. D.K.Kwak, "A Study on PFC Buck-Boost AC-DC Converter of Soft Switching", Journal of KIPE, Vol. 12, No. 6, 465-471(2007).