

고효율 절연형 DC-DC 초퍼의 특성해석

†곽동걸*, 이봉섭**, 김춘삼**, 정도영**, 김수광***

*강원대학교 방재기술전문대학원, **강원대학교 전기제어공학부, *** (주)동해삼테크

Performance Analysis of High Efficiency DC-DC Chopper added in Electric Isolation

*Dong-Kurl Kwak, **Bong-Seob Lee, **Choon-Sam Kim, **Do-Young Jung, ***Soo-Kwang Kim

*The Professional Graduate School of Disaster Prevention Technology, Kangwon University,

School of Electrical and Control Engineering, Kangwon University, *Donghae Samtek co.

ABSTRACT

This paper is analyzed for DC-DC chopper performance of high efficiency added in electric isolation. The general converters of high efficiency are made that the power loss of the used switching devices is minimized. To achieve high efficiency system, the proposed chopper is constructed by using a partial resonant circuit. The control switches using in the chopper are operated with soft switching for a partial resonant method. The control switches are operated without increasing their voltage and current stresses by the soft switching technology. The result is that the switching loss is very low and the efficiency of chopper is high. And the proposed chopper is added in a electric isolation. When the power conversion system is required to electric isolation, the proposed chopper is adopted with system development of high efficiency. The soft switching operation and the system efficiency of the proposed chopper is verified by digital simulation and experimental results.

1. 서론

최근 스위치 모드 전력변환기(SMPC)들은 스위칭 주파수를 높임으로써 변환기의 소형화, 경량화 그리고 저잡음화 등을 성취하였다. 그러나 이들 변환기에 사용된 스위치들은 높은 스위칭 주파수에 의해 스위칭 손실이 크며 많은 스트레스를 받게 되어 변환기의 효율을 현저히 감소시킨다. 또한 전력변환기들은 스위치를 보호하기 위해서 스위치 주변에 스너버 회로를 이용하여 보완하지만 출력전류가 증가할 경우 스너버 손실이 크게 되어 효율은 더욱 감소된다. 이들을 개선하기 위하여 스위치의 동작을 소프트 스위칭 즉, 영전압 스위칭(ZVS) 또는 영전류 스위칭(ZCS)으로만들어서 스위칭 손실 및 스너버 손실을 감소시키는 회로 토폴로지들이 많이 연구되고 있다.^[1,2] 이들 소프트 스위칭 회로들은 변환기의 스위치 단에 공진회로의 기법을 적용시킨 것이라 할 수 있다. 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 있다. 본 논문에서는 소프트 스위칭을 위한 공진회로부의 구조와 스위칭 제어기법이 간단한 부분공진회로 토폴로지를 개발하여

제안한다. 제안한 초퍼의 부분공진회로는 기존의 컨버터에 사용되는 스너버 회로를 공진회로로 변형 설계한 새로운 회로구조로써 회로구성이 간단하며, 부분공진용으로 이용된 커패시터는 기존의 스너버용 커패시터와 달리 무손실로 동작되고 사용된 제어용 스위치들의 소프트 스위칭에 의한 초퍼의 효율을 증대시킨다.^[3] 또한 제안한 고효율 DC-DC 초퍼는 절연형으로 설계되어 절연이 필요한 전력변환기들에 적용될 수 있는 장점이 있다.

2. 제안한 초퍼의 회로 토폴로지 및 동작원리

2.1 초퍼의 회로 토폴로지

대전력용으로 이용되는 전력변환기들은 스위치를 보호하기 위해 그림 1과 같이 스위치 주변에 필히 스너버(snubber) 회로를 이용하여 보완하지만 출력전류가 증가할 경우 스너버 손실이 크게 되어 변환기의 효율을 더욱 감소시킨다.

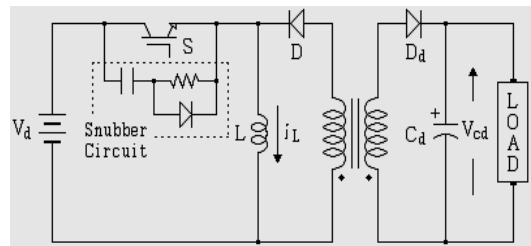


그림 1 기존의 절연형 DC-DC 초퍼
Fig. 1 Conventional DC-DC chopper of electric isolation

이들을 개선하기 위하여 본 논문에서는 소프트 스위칭을 위한 부분공진회로 토폴로지를 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, 또한 부분공진용으로 이용된 커패시터는 기존의 스너버용 커패시터와 달리 무손실로 동작되고, 사용된 제어스위치들의 소프트 스위칭에 의한 초퍼의 효율을 증대시킨다. 제안한 새로운 고효율 절연형 DC-DC 초퍼의 주 회로도를 그림 2에 나타낸다. 회로구성은 승강압용 제어 스위치 S_1 , S_2 , 소프트 스위칭을 위한 부분공진용 소자 L_r 과 C_r 그리고 주변소자들과 절연을 위한 출력측 펄스변압기로 구성된

다. 부분공진회로는 기존의 전력변환기들에 사용되는 스너버 회로를 변형 설계한 구조로써 무손실 스너버로 동작된다.

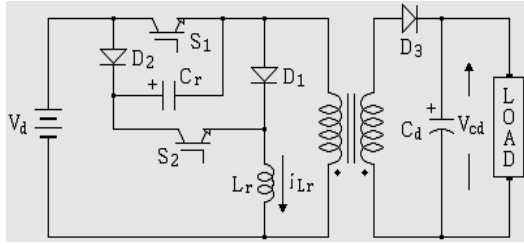


그림 2 제안한 고효율 절연형 DC-DC 초퍼
Fig. 2 Proposed high efficiency DC-DC chopper of electric isolation

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 초퍼는 PWM 스위칭 제어에 의해 출력전압이 조정되고 듀티율 일정 스위칭 제어에 의한 전류불연속 모드로 동작된다. 그 결과 제안한 초퍼는 소프트 스위칭에 의해 고효율로 동작되고 듀티율 일정 스위칭 제어에 의한 제어기법과 제어회로가 간단한 장점이 주어진다.

2.2 제안된 초퍼의 동작원리

그림 3은 스위칭 1주기(T_c)에 대한 각 동작모드별 등가회로를 나타내고 있으며 4가지 동작모드로 구분된다. 초퍼의 초기 조건으로 스위치 S_1 , S_2 는 오프, 커패시터 C_r 에는 입력전압 V_d 와 출력측 C_d 의 전압 V_{cd} 의 합($= V_d + V_{cd}$)으로 충전되어 있다.

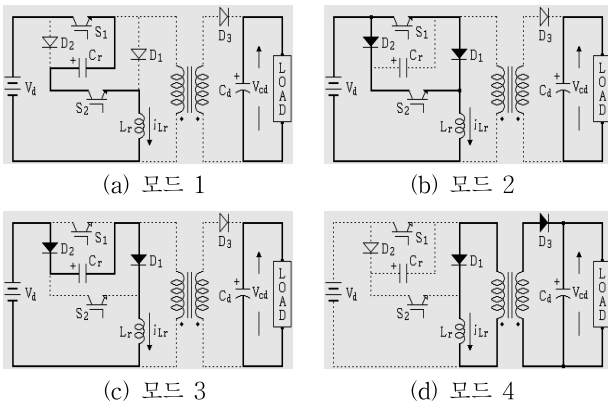


그림 3 스위칭 1주기에 대한 동작모드별 등가회로
Fig. 3 Equivalent circuits in one cycle switching

모드 1 ($T_1 = t_1 - t_0$)

시각 t_0 에서 스위치 S_1 과 S_2 를 동시에 턴-온하면, 회로경로는 $V_d - S_1 - C_r - S_2 - L_r - V_d$ 의 직렬공진회로가 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} 과의 합이 인덕터 L_r 에 인가되어 L_r 와 커패시터 C_r 는 직렬공진을 하고 C_r 가 방전한다. 커패시터 전압 v_{cr} 이 영으로 되면 모드 1은 종료된다.

모드 2 ($T_2 = t_2 - t_1$)

모드 2는 커패시터 전압이 영으로 되어 다이오드 D_1 과 D_2 가 도통되는 모드이다. 제어스위치들에 의한 단락회로가 형성되어 인덕터 L_r 의 전류는 $S_1 - D_1$, $D_2 - S_2$ 의 두 회로로 분류된다. 이 모드의 기간에서 인덕터 L_r 의 전류는 직선적으로 증가하며 에너지를 축적한다.

모드 3 ($T_3 = t_3 - t_2$)

시각 t_2 에서 스위치 S_1 , S_2 를 오프하면, 인덕터 전류 i_{Lr} 는 $D_2 - C_r - D_1$ 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 공진초기에 커패시터 전압이 영이므로 ZVS로 동작된다. 이 모드는 커패시터 전압 v_{cr} 이 출력전압 $V_d + V_{cd}$ 로 되면 끝난다.

모드 4 ($T_4 = t_4 - t_3$)

모드 4는 커패시터 C_r 의 충전이 끝난 후 다이오드 D_1 과 D_3 를 통하여 인덕터 전류가 부하측 변압기로 전송되는 모드이다. 이 때의 인덕터 전류 i_{Lr} 는 직선적으로 감소되고, 부하측 커패시터 C_d 를 충전시킨다.

3. 시뮬레이션 결과 및 실험 결과

제안한 고효율 초퍼의 동작특성을 확인하기 위해 PSpice로 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션에 사용된 회로정수들을 표 1에 나타낸다. 제어스위치는 가변저항 스위치로 가정하고 그 외 소자는 이상적인 소자로 간주하였다. 제안된 초퍼의 스위칭 동작에 대한 각부의 시뮬레이션 동작파형을 그림 4에 나타낸다.

표 1 시뮬레이션에 사용된 회로정수
Table 1 Parameters of simulated circuit

입력전압 V_d	100V	평할 커패시터 C_d	1000 μ F
출력전압 V_{cd}	200V	부하저항 R_L	100 Ω
공진인덕터 L_r	100 μ H	스위칭 주파수 f_c	40 kHz
공진커패시터 C_r	50 nF	듀티율 D_c	40%

그림 4에는 공진회로의 인덕터 전류 i_{Lr} 와 커패시터 전압 v_{cr} 을 스위칭 1주기에 대해 모드별로 나타내며 또한 제어스위치의 양단전압 v_{s1} , v_{s2} 와 전류 i_{s1} , i_{s2} 동작파형 등을 나타낸다.

결과파형을 검토해보면, 시각 t_0 에서 스위치 S_1 , S_2 를 턴-온하면 LC 직렬 공진회로에 의한 C_r 이 방전을 시작하고 인덕터 L_r 는 에너지를 축적한다. 이 시점에서의 S_1 , S_2 의 전류는 i_{Lr} 와 같으므로 스위치들의 턴-온 동작은 ZCS로 된다. 시각 t_1 에서 커패시터 전압 v_{cr} 이 영으로 되면 제어소자들에 의한 단락회로가 형성되어 인덕터 L_r 의 전류는 직선적으로 증가하며 에너지를 축적한다. 이 시점의 인덕터 전류는 스위치 S_1 과 S_2 로 분류된다. 시각 t_2 에서 스위치를 오프하면 다시 직렬 공진회로에 의한 C_r 이 충전을 한다. 이 시점에서의 스위치 S_1 , S_2 양단전압은 커패시터 전압과 같으므로 스위치들의 턴-오프 동작은 ZVS로 된다. 시각 t_3 에서 커패시터 전압은 $v_r + V_{cd}$ 로 되고 인덕터 전류는 부하로 전송되어 직선적으로 감소하여 시각 t_4 에서 영으로 된다. 이상의 컴퓨터 시뮬레이션 결과들은 앞서의 이론적 해석의 타당성이 입증된다.

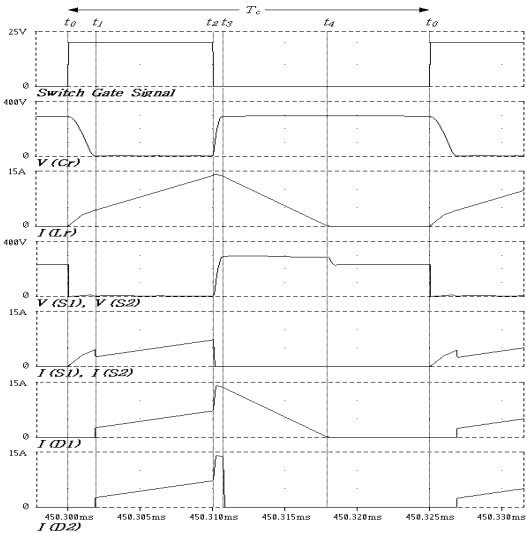
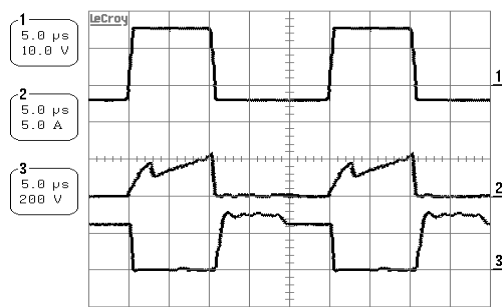


그림 4 스위칭 동작에 대한 시뮬레이션 파형
Fig. 4 Simulation waveforms in one cycle switching

실험회로 구성은 전력용량 1kW급, DC 100V의 입력전압에 DC 200V의 출력전압으로 설계하였으며, 제어스위치의 구동 스위칭 주파수는 40[kHz]를 기준하여 DSP프로세서에 PWM 데이터 테이블을 작성하여 듀티를 변화에 따른 각부 동작파형을 측정 검증하였다.



(a) 인덕터 전류 i_{Lr} 와 커패시터 전압 v_{cr}



(b) 스위치 전류 i_s 와 스위치 양단전압 v_s

그림 5 스위치 제어신호에 대한 각 부의 실험파형
Fig. 5 Experimental waveforms of each part

그림 5는 제어스위치 S_1, S_2 의 듀티율 40[%]인 게이트 제어 신호에 대한 인덕터 전류 i_{Lr} 와 커패시터 전압 v_{cr} 의 파형과 스위치 S_1, S_2 에 흐르는 전류 i_s 와 스위치 양단에 걸리는 전압 v_s 의 파형을 나타낸다. 그림 5(a)의 실험파형에서 공진회로는 공진 1주기 동안 지속적으로 이루어지지 않고 스위치의 턴-온과

턴-오프 시에만 부분적인 공진동작을 볼 수 있으며, 이러한 동작에 의해 공진소자들의 용량분담과 스트레스를 줄이고, 출력 전류가 증가할 경우 공진손실이 감소된다. 그리고 그림 5(b)에서 제어스위치들은 공진동작에 의해 영전류에서 턴-온되며 영전압에서 턴-오프되는 소프트 스위칭 동작을 보인다. 이것은 무손실 스너버 회로가 적용된 제안된 벡-부스터 컨버터가 기존의 하드 스위칭 벡-부스터 컨버터와 비교하여 스위칭 손실이 적게 되어 컨버터의 효율을 증대시켰다.

이상의 실험파형들은 스위칭 주파수 40[kHz], 듀티율 40[%]에 대한 앞서의 시뮬레이션결과와 잘 일치된다. 그림 6은 제안된 소프트 스위칭 컨버터와 기존의 하드 스위칭 컨버터의 효율 측정 비교를 나타낸다. 제안된 컨버터는 사용된 제어 스위치의 턴-온과 턴-오프 손실이 크게 줄어 효율이 상당히 개선되었다.

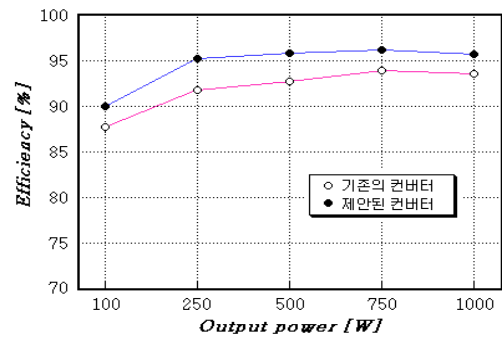


그림 6 효율측정 비교
Fig. 6 Measured efficiency comparison

4. 결론

본 논문에서는 새로운 고효율 절연형 DC-DC 초퍼를 제안하여 기존의 하드 스위칭형 초퍼와 비교 검토되었다. 제안한 초퍼는 부분공진 기법이 적용된 새로운 소프트 스위칭 회로가 설계되어 스위칭 손실 저감에 따른 높은 효율을 가졌다. 제안한 초퍼의 소프트스위칭 회로는 구조적으로 기존의 초퍼에 사용되는 승강압용 인덕터와 스너버 회로를 변형 설계한 구조로써 회로구성이 간단하였다. 또한 사용된 제어스위치는 PWM 제어에 의해 조정되고 인덕터에 흐르는 전류는 불연속모드로 제어되어 제어회로와 제어기법이 간단한 장점이 주어졌다.

본 연구는 중소기업청에서 시행한 산학연공동기술개발 컨소시엄사업에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] Q. Zhao, et al, "Single-Switch Parallel Power Factor Correction AC-DC Converters with Inherent Load Current Feedback", IEEE Trans. on PE, Vol. 19, No. 4, 2004.
 [2] X. Ruan, et al, "Zero-Voltage-Switching PWM Hybrid Full-Bridge Three-Level Converter", IEEE Trans. on PE, Vol. 20, No. 2, pp. 395-404, 2005.
 [3] D.K. Kwak, C.S. Kim, "A study on high efficiency boost DC-DC converter of discontinuous current mode control", Trans. KIEE, Vol.54, No.9, pp. 431-436, 2005.