

단일 펄스 소프트 스위칭을 이용한 고역률 고효율 DC-DC 컨버터

정상화 · 권순걸 · 서기영 · 이현우 · 곽동걸*** · 김영철***
 경남대학교 · 동해대학** · LG산전***

High Power Factor and High Efficiency DC-DC Converter using Single-Pulse Soft-Switching

S.H.Jung · S.K.Kwon · K.Y.Suh · H.W.Lee · D.K.Gac*** · Y.C.Kim***
 Kyungnam Univ · Donghae Univ*** · LGIS Co.,Ltd.***

Abstract - Power conversion system must be increased switching frequency in order to achieve a small size, a light weight and a low noise. However, the switches of converter are subjected to high switching power losses and switching stresses. As a result of those, the power system brings on a low efficiency. To improved these, a large number of soft switching topologies included a resonant circuit has been proposed. But these circuits increase number of switch in circuit and complicate sequence of switching operation. In this paper, the authors propose a high power factor and high efficiency DC-DC converter using single-pulse soft switching by partial resonant switching mode. The switching devices in a proposed circuit are operated with soft switching by the partial resonant method, that is, Partial Resonant Switch Mode Power Converter. The partial resonant circuit makes use of a inductor using step up and a condenser of loss-less snubber. The result is that the switching loss is very low and the efficiency of system is high. Also the proposed converter is deemed the most suitable for high power applications where the power switching devices are used. Some simulative results on computer results are included to confirm the validity of the analytical results.

에 축적된 에너지는 스위치 S_1, S_2 의 턴-온 시에 전원측으로 회생되는 모드를 가진다. 스위치 S_1, S_2 의 턴-온은 인덕터 L_r 의 전류가 불연속적으로 제어되므로 영전류 스위칭 (ZCS)으로 되고, 턴-오프는 C_r 의 전압이 영으로 될 때 동작하므로 영전압 스위칭 (ZVS)으로 된다. 입력단의 인덕터 L_r 와 콘덴서 C_r 는 입력전류를 평활하기 위한 펄스로 동작한다. 출력 부하측 인덕턴스가 공진용 인덕턴스와 비교하여 충분히 큰 것으로 가정하면, 공진 1주기 동안에는 부하를 정전류원 I_o 로 보는 것이 가능하다.

1. 서 론

본 논문에서 제안한 단일 펄스 소프트 스위칭을 이용한 고역률, 고효율 DC-DC 컨버터는 전력변환기에 사용된 스위치들의 동작을 스위치 동작 시에만 공진회로를 형성시키는 부분공진의 기법이 적용된 부분공진 스위치 모드 전력변환기라 할 수 있다. 이것은 스위치 동작을 소프트 스위칭으로 만들어 스위칭 손실을 저감시키며, 부분공진으로 인하여 공진 회로부의 손실 및 공진용 소자들의 스트레스를 감소시켜 준다. 그리고 본 회로의 공진회로부는 구조적으로 일반적인 부스트 컨버터에 사용되는 승압용 인덕터와 스위칭 모드 전력변환기에 이용되는 스너버 회로의 스너버 콘덴서를 이용하여 실현된다. 그러므로 제안회로에서 인덕터는 승압과 공진용으로 이용되고 스너버 콘덴서가 공진용 소자로 이용됨으로써 회로구조가 간단하다. 그리고 회로내에 사용된 제어소자들의 적정배치로 인해 소자들은 용량분담이 줄고 제어기법이 간단하다. 또한 스너버 콘덴서는 공진회로부의 동작에 의해 콘덴서에 축적된 에너지를 전원측으로 회생시켜 무손실 스너버 콘덴서로 되어 변환기의 효율을 증대시키는 장점이 부여된다.

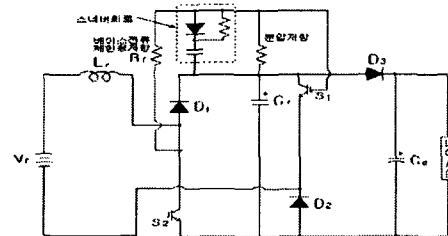
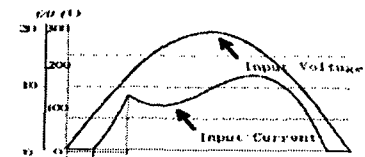


그림 1 제안한 DC-DC 컨버터의 주 회로
 Fig. 1 Circuit of proposed DC-DC converter

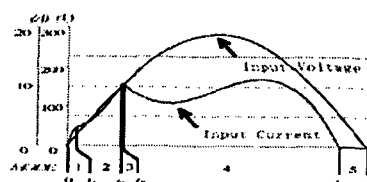
2. 제안한 단일 펄스 소프트 스위칭을 이용한 고역률, 고효율 DC-DC 컨버터

2.1 회로구성 및 동작원리

단일 펄스 스위칭을 이용한 고역률, 고효율 DC-DC 컨버터의 주 회로도들 그림 1에 나타낸다. 회로구성은 기존의 DC-DC 컨버터의 입력측과 부하단 사이에 소프트 스위칭과 승압을 겸하는 공진 회로와 각종 보호회로를 접속한다. 공진 회로부는 제어소자들과 승압용(&공진용)인덕터 그리고 로스레스 스너버 콘덴서로 구성되며, 콘덴서



(a) 기존의 회로



(b) 제안한 회로

그림 2 기존의 컨버터와 제안한 컨버터의 입력 전압과 전류파형
 Fig. 2 Waveform input voltage and current of the conventional converter and proposed converter

그림 2는 기존의 하드 스위칭 컨버터와 제안하는 단일 펄스 소프트 스위칭 컨버터의 입력전압과 전류의 파형을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 제안한 방식이 거의 단위역률을 이루고 있다.

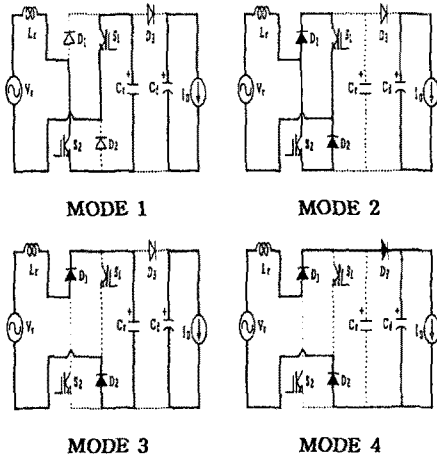


그림 3 각 동작모드별 등가회로
Fig. 3 Each operation mode of equivalent circuit

그림 3은 스위칭 한 주기에서의 각 동작모드별 등가회로를 나타내고 있으며 네가지 동작모드로 구분된다. 공진회로부의 초기조건으로 스위치 S_1, S_2 는 오픈, 공진용 콘덴서 C_r 에는 출력측 평활용 콘덴서 C_d 의 전압 V_{cd} 로 충전되어 있다. 또한 교류 입력전류 v_m 과 다이오드 브리지 전파정류기의 출력전압 v_r 을 다음 식으로 놓는다.

$$v_m = V_m \sin \omega_s t \quad (1)$$

$$v_r = |v_m| = |V_m \sin \omega_s t| \quad (2)$$

< 모드 1 ; $T_1, t_0 < t \leq t_1$ >

시각 t_0 에서 스위치 S_1 과 S_2 를 동시에 턴-온 하면, 회로 경로는 v_r - L_r - S_2 - C_r - S_1 - v_r 의 직렬 회로가 형성된다. 턴-온 직전의 인덕터 L_r 에 흐르는 전류 i_{Lr} 는 영이므로 S_1, S_2 는 ZCS로 동작을 한다. 그리고 정류기 출력전압 v_r 과 콘덴서의 충전전압 V_{cr} (=출력전압 V_{cd})와의 합이 인덕터 L_r 에 인가되어 L_r 와 콘덴서 C_r 는 직렬공진을 하고 C_r 가 방전한다. 공진 인덕터의 저항을 무시하면, 스너버 콘덴서의 전압 v_{cr} 는 식 (3)과 같이 방전하고, 인덕터 L_r 에 흐르는 전류 i_{Lr} 는 식 (4)와 같이 증가한다. 콘덴서 전압 v_{cr} 이 영으로 될 때 모드 1은 끝나며, 식 (5)는 이 모드의 기간이고, 식 (6)은 이 모드가 끝나는 시점의 인덕터 전류이다.

$$v_{cr} = (v_r + V_{cd}) \cos \omega_r t - v_r \quad (3)$$

$$i_{Lr} = \frac{v_r + V_{cd}}{X} \sin \omega_r t \quad (4)$$

$$T_1 = \sqrt{L_r C_r} \cos^{-1} \left(\frac{v_r}{v_r + V_{cd}} \right) \quad (5)$$

$$I_1 = \frac{1}{X} \sqrt{V_{cd}^2 + 2v_r V_{cd}} \quad (6)$$

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

< 모드 2 ; $T_2, t_1 < t \leq t_2$ >

모드 2는 콘덴서 전압 v_{cr} 이 영으로 되어 다이오드 D_1, D_2 가 도통되는 모드이다. 제어 스위치들에 의한 단락회로가 형성되어 인덕터 L_r 의 전류는 D_1 - S_1, S_2 - D_2 의 두 회로로 분류한다. 이 모드의 기간에서 인덕터 L_r 는 에너지를 축적한다. 이 때의 인덕터 전류 i_{Lr} 는 식 (7)과 같이

직선적으로 증가한다. T_2 는 스위치 S_1, S_2 를 오픈하기까지의 시간으로 식 (8)과 같다. 식 (9)은 이 모드가 끝나는 시점의 인덕터 전류이다.

$$i_{Lr} = \frac{v_r}{L_r} t + I_1 \quad (7)$$

$$T_2 = T_{on} - T_1 \quad (8)$$

$$I_2 = \frac{v_r}{L_r} T_2 + I_1 \quad (9)$$

< 모드 3 ; $T_3, t_2 < t \leq t_3$ >

시각 t_2 에서 스위치 S_1, S_2 를 오픈하면 인덕터 L_r 의 전류 i_{Lr} 는 D_1 - C_r - D_2 를 통하여 흐르며 인덕터 L_r 와 콘덴서 C_r 는 다시 직렬공진을 하고 C_r 를 충전시킨다. 콘덴서 C_r 와 병렬로 배치된 스위치들의 턴-오프 동작은 공진 초기 콘덴서 C_r 의 전압이 영이므로 ZVS로 동작된다. 이 모드에서의 스너버 콘덴서의 전압 v_{cr} 은 식 (10)과 같으며, 인덕터 L_r 에 흐르는 전류 i_{Lr} 는 식 (11)과 같다.

$$v_{cr} = v_r + \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} I_a \sin(\omega_r t + \theta) \quad (10)$$

$$i_{Lr} = I_a \cos(\omega_r t + \theta) \quad (11)$$

콘덴서의 전압 v_{cr} 이 출력전압 V_{cd} 로 될 때 이 모드는 끝나며, 이 모드의 기간 T_3 는 식 (12)이며, 인덕터의 최종전류 I_3 는 식 (13)과 같다.

$$T_3 = \sqrt{L_r C_r} \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{V_{cd} - v_r}{\sqrt{v_r^2 + \frac{L_r}{C_r} I_a^2}} \right) - \theta \right\} \quad (12)$$

$$I_3 = I_2 \cos \omega_r T_3 + \sqrt{\frac{C_r}{L_r}} v_r \sin \omega_r T_3 \quad (13)$$

여기서 $I_a = \sqrt{\frac{C_r}{L_r} v_r^2 + I_2^2}$,

$$\theta = \sin^{-1} \left(-\frac{v_r}{\sqrt{v_r^2 + \frac{L_r}{C_r} I_2^2}} \right)$$

< 모드 4 ; $T_4, t_3 < t \leq t_4$ >

모드 4는 인덕터 L_r 에 흐르는 전류가 부하측으로 유입되어 직선적으로 감소한다. 이 모드는 인덕터 전류 i_{Lr} 가 영이 되면 끝난다. 이 모드에서 인덕터 전류 i_{Lr} 는 식 (14)와 같으며, 이 모드의 기간 T_4 는 식 (15)와 같다.

$$i_{Lr} = \frac{v_r - V_{cd}}{L_r} t + I_3 \quad (14)$$

$$T_4 = \frac{L_r}{V_{cd} - v_r} I_3 \quad (15)$$

3. 시뮬레이션 결과 및 검토

제안한 단일 펄스 소프트 스위칭 컨버터의 스위칭 동작에 대한 각부 동작 시뮬레이션 파형을 그림 4에 나타낸다. 제어 스위치는 가변저항 스위치로 가정하고 그 외 소자는 이상적인 소자로 하여 PSpice에 의한 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션에 사용된 회로정수들을 표 1에 나타낸다.

표 1 시뮬레이션에 사용된 회로정수
Table 1 Parameters of simulated circuit

입력전압 V_r	100[V]
출력전압 V_{cd}	190[V]
공진 인덕터 L_r	70[μ H]
공진 콘덴서 C_r	100[nF]
평활용 콘덴서 C_d	1000[μ F]
부하 전류인 I_o	3[A]
스위칭 주파수 f_s	20[kHz]
듀티율 D	30[%]

그림 4에는 각 모드의 구간에 대해서 나타내고 있으며, 시간 t_0 에서 스위치 S_1, S_2 를 턴-온하면, LC 직렬 공진회로에 의한 콘덴서 C_r 이 방전을 시작하고 인덕터 L_r 는 에너지를 축적하게 된다. 이 시점에서의 스위치 S_1, S_2 를 통하는 전류 i_s 는 인덕터 전류 i_{Lr} 와 같고, 스위치들은 ZCS로 동작을 한다. 시간 t_1 에서 콘덴서 전압 v_{cr} 이 영으로 되면, 제어 스위치들에 의한 단락회로가 형성되어 인덕터 L_r 의 전류는 직선적으로 증가하며 에너지를 축적한다. 이 시점의 인덕터 전류 i_{Lr} 는 스위치 S_1 와 S_2 로 분류되므로 스위치의 도통 손실이 반으로 감소된다. 이것은 스위치 한개를 사용한 기존의 승압형 컨버터와 비교하여 제안회로에서는 스위치의 수는 하나 더 증가되었지만 도통손실은 거의 비슷하다고 할 수 있다. 시간 t_2 에서 스위치를 오프 하면, 다시 LC 직렬 공진회로에 의한 콘덴서 C_r 이 충전을 시작한다. 그리고 이 시점에서의 스위치 S_1, S_2 양단전압은 콘덴서 전압 v_{cr} 과 같고, 스위치들은 ZVS로 동작을 한다. 시간 t_3 에서 콘덴서 전압 v_{cr} 은 출력전압 V_{cd} 로 되고, 인덕터 L_r 의 전류 i_{Lr} 는 부하측으로 유입되어 직선적으로 감소한다. 시간 t_4 는 i_{Lr} 이 영으로 되는 시간이다. 구간 T_c 는 스위치 동작의 1 주기를 나타낸다. 제안한 소프트 스위칭 컨버터는 동일한 전력용량 하에서 기존의 하드 스위칭 승압형 컨버터와 비교하여 스위칭의 듀티율을 적게해도 동일 출력을 낼 수 있다는 장점이 부여된다. 이것은 스위치의 턴-온 동작에 의해 공진용으로 이용된 로스레스 스너버 콘덴서의 축적된 에너지가 입력측으로 회생되어 승압용 소자 즉 인덕터에 부가되기 때문이다.

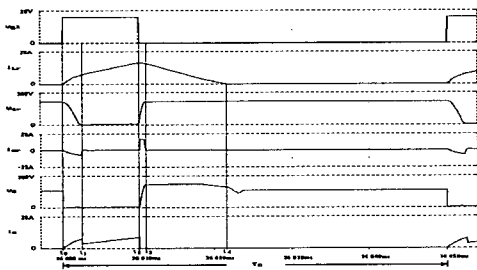


그림 4 스위칭 동작에 대한 각부 시뮬레이션 파형
Fig. 4 Simulated waveforms for switching operation

본 제안회로의 장점으로는 같은 전력용량하에서 소프트 스위칭 동작이 하드 스위칭 동작과 비교하여 스위칭의 듀티율이 적게 되는 것이다. 이것은 스위치의 턴-온 동작에 의해 공진용으로 이용된 로스레스 스너버 콘덴서의 축적된 에너지가 입력측으로 회생되어 승압용 소자 즉 인덕터에 부여되기 때문이다. 그래서 제안한 단일 펄스 소프트 스위칭 DC-DC 컨버터는 스위치의 손실이 더욱 감소되어 시스템 효율이 더욱 증대된다. 그림 5와 6은 제안된 단일 펄스 소프트 스위칭 DC-DC 컨버터와 기존의 하드 스위칭 컨버터의 역할과 효율 측정 비교를 나타낸다. 사용된 IGBT 스

위치 소자에 대해서 하드 스위칭 컨버터는 용량을 증가시킬 경우 스위치의 턴-오프 손실이 크게 되어 출력용량이 약 870[W]에 한정되었지만, 제안한 단일 펄스 소프트 스위칭 컨버터는 1[kW]이상으로 동작이 가능하였으며 스위치 턴-온, 턴-오프 손실이 크게 줄어 효율과 역률이 상당히 개선되었다.

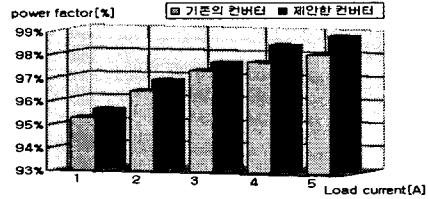


그림 5 제안한 컨버터와 기존의 컨버터의 역률의 비교
Fig. 5 Power factor comparison of proposed converter and conventional converter

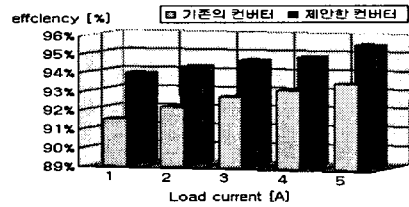


그림 6 제안한 컨버터와 기존의 컨버터의 효율의 비교
Fig. 6 Efficiency comparison of proposed converter and conventional converter

4. 결 론

본 논문에서는 회로가 간단하면서도 부분공진 스위칭이 되는 “단일 펄스 소프트 스위칭을 이용한 고역률, 고효율 DC-DC 컨버터”를 제안하였다. 사용된 스위치들의 동작은 스위치 동작 시에만 공진회로를 형성시키는 부분공진의 기법이 적용되어 스위치들을 소프트 스위칭으로 만들어 스위칭 손실을 저감시키며, 부분공진으로 인하여 공진 회로부의 손실 및 공진용 소자들의 스트레스를 감소시켜 주어 시스템의 효율이 증대되었다. 그리고 본 회로의 부분공진 회로부는 구조적으로 일반적인 부스트 컨버터에 사용되는 승압용 인덕터와 스위칭 모드 전력변환기에 이용되는 스너버 회로의 스너버 콘덴서를 이용하여 실현되었다. 그러므로 제안회로에서 인덕터는 승압과 공진용으로 이용되고 스너버 콘덴서가 공진용 소자로 이용됨으로써 회로구조가 간단하다. 또한 스너버 콘덴서는 공진회로부의 동작에 의해 콘덴서에 축적된 에너지를 전원측으로 회생시켜 무손실 스너버 콘덴서로 되고, 회생된 에너지는 승압용 소자에 부여되어 같은 전력용량 하에서 하드 스위칭 동작과 비교하여 스위칭의 듀티율이 적게 되어 변환기의 효율을 더욱 증대시키는 장점이 부여되었다.

이 논문(보고서)은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축지원 사업의 지원에 의하여 수행된 연구결과입니다

[참고 문헌]

- [1]B.K. Bose, J.S. Lai, "An Improved Resonant DC Link Inverter for Induction Motor Drives", Conf. Rec. of IEEE/LAS Annu Meeting, pp. 742-743, 1988
- [2]D.K. Kwak, H.W. Lee, "Single-Phase converter with partial resonant circuit", KIEE Autumn Conf. Rec, pp.129-131, 1993
- [3]D.K. Kwak, H.W. Lee, "Partial resonant PWM converter using snubber condenser", KIEE, Conf. Rec, pp. 58-61, 1994