

소프트 스위칭형 PFC 승강압 AC-DC 컨버터에 관한 연구

†곽동걸*, 이승호*, 이봉섭**, 정도영**, 심재선**, 임진근***

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

A Study on PFC Buck-Boost AC-DC Converter by Soft Switching Method

*Dong-Kurl Kwak, *Seung-Ho Lee, **Bong-Seob Lee, **Do-Young Jung, **Jae-Sun Shim, ***Jin-Geun Im

*Professional Graduate School of Disasters Prevention Technology, Kangwon University,

Division of Electrical and Control Engineering, Kangwon University, *Semyeong eng. Co.

ABSTRACT

Authors propose a PFC(power factor correction) Buck-Boost AC-DC converter by soft switching method. The proposed converter for a discontinuous conduction mode eliminates the complicated control requirement and reduces the size of components. The input current waveform in the converter is got to be a sinusoidal form of discontinuous pulse in proportion to magnitude of ac input voltage under the constant duty cycle switching. Therefore, the input power factor is nearly unity and the control algorithm is simple. To achieve high efficiency system, the proposed converter is constructed by using a partial resonant technique. The control switches using in the converter are operated with soft switching for a partial resonant. The control switches are operated without increasing their voltage and current stresses by the soft switching method. The result is that the switching loss is very low and the efficiency of converter is high.

1. 서론

교류 상용전원을 입력으로 하는 많은 전력변환기들은 전력 변환에 의해 입력전류의 왜형을 발생시켜 입력역률을 저하시키고 많은 고조파를 발생시켜 큰 문제점으로 되고 있다. 최근 입력전류 왜형개선에 관한 연구들이 활발히 진행 중이며, 특히 입력단 정류회로에 AC-DC 승강압 컨버터를 접속하여 입력전류를 정현파상으로 제어하여 왜형개선을 이루고 입력역률을 증대시키는 역률개선용(PFC) 컨버터들이 많이 연구된다.^[1]

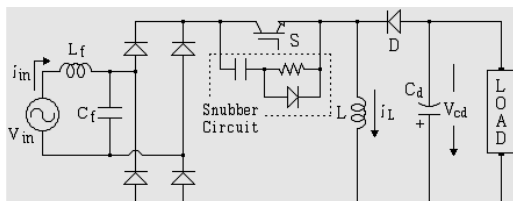


그림 1 기존의 PFC 승강압 컨버터
Fig. 1 Conventional PFC Buck-Boost converter

일반적으로 사용되는 역률개선용 승강압 컨버터는 그림 1과

같이 에너지 축적용 인덕터 L을 이용하여 스위치의 PWM 제어에 의해 실현된다. PWM 제어에 의해 승강압용 인덕터에 흐르는 전류는 불연속모드 또는 연속모드로 제어된다. 전류불연속 모드 제어방식은 인덕터 전류를 불연속으로 제어하는 방식으로 스위치의 듀티율 일정제어에 의해 정현파 입력전압의 크기에 비례한 불연속적인 펄스열의 정현파상으로 만들어 역률을 개선시킨다.^[1] 또한 전류불연속 제어에 의한 구성소자의 용량이 감소되고 듀티율 일정제어에 의해 제어회로와 제어 알고리즘이 간단하며, 사용된 제어스위치 턴-온 동작이 인덕터 전류 i_L 가 영전류에서 스위칭되어 스위칭 손실이 없는 장점이 주어진다.^[2] 이러한 이점이 많은 전류불연속 제어방식의 가장 큰 문제점으로, 제어 스위치의 턴-오프 동작이 스위칭 시점의 최대 인덕터 전류에서 동작되는 하드 스위칭으로 되어 스위칭 주파수의 증가와 더불어 스위치 스트레스와 스위칭 손실이 증대되는 문제점이 있다. 그리고 하드 스위칭에 의한 스위치의 소손을 방지하기위해 컨버터들은 필히 스너버(snubber)를 사용하게 되지만 [그림 1], 이에 상당한 스너버 손실로 인한 컨버터의 효율을 감소시키는 요인이 된다.

본 논문에서는 스위칭 손실을 최소로 하여 컨버터의 효율을 상승시키기 위해, 제어스위치들의 소프트 스위칭을 위한 부분공진회로가 첨부된 새로운 고효율 컨버터가 제안된다. 제안한 부분공진회로는 기존의 스너버를 활용하여 구성되며, 스너버 저항이 제거된 구조로써 부분공진에 의해 스너버 커패시터는 무손실로 동작된다. 부분공진동작에 의해 스너버 커패시터에 축전된 에너지는 손실없이 입력측으로 유입되어 입력전류를 상승시키게 되며, 이는 기존의 PFC 컨버터에 비해 고조파 저감과 입력역률을 더욱 증대시키는 효과를 가진다.

2. 새로운 PFC 승강압 AC-DC 컨버터

2.1 회로구성

제안한 소프트 스위칭형 PFC 승강압 AC-DC 컨버터를 그림 2에 나타낸다. 회로구성은 기존의 PFC 승강압 컨버터에 소프트 스위칭 (ZCS, ZVS)을 위한 부분공진회로를 접속한다. 부분공진회로는 승강압용 인덕터 L_r , 기존의 스위치 보호용으로 이용되는 스너버 커패시터 C_r 와 제어소자들로 구성된다. 제안된 컨버터는 PWM제어에 의해 출력전압이 조정되고, 듀티율 일정 스위칭 제어에 의한 전류불연속 모드로 동작되어 인덕터 전류는 정현파 입력전압의 크기에 비례한 불연속적인 펄스열의 정현파상으로 되어 역률을 개선시킨다. 그리고 사용된 제어스

위치 S_1 , S_2 의 턴-온, 턴-오프 동작은 소프트 스위칭으로 되어 변환기의 효율을 증대시킨다.

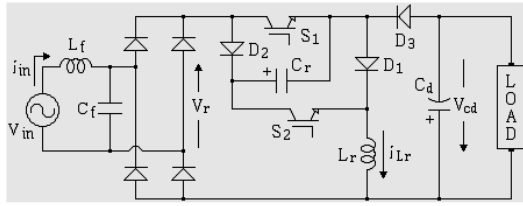


그림 2 새로운 소프트 스위칭형 PFC 승강압 컨버터
Fig. 2 Novel PFC Buck-down converter by soft switching

또한 공진용 소자로 이용된 스너버 커패시터 C_r 는 축적된 에너지를 손실없이 입력측으로 유입시켜 무손실 스너버 커패시터로 동작되고 입력전류를 상승시키게 된다. 그 결과 입력전류의 고조파 성분이 감소되어 역률을 증대시키는 특징이 있다.

2.2 동작원리 해석

그림 3은 스위칭 1주기(T_c)에 대한 동작모드별 등가회로를 나타내고 있으며 4가지 동작모드로 구분된다. 공진회로부의 초기조건으로 스위치 S_1 , S_2 는 오프이며 공진용 커패시터 C_r 에는 정류기 출력전압 v_r 와 출력측 평활용 커패시터 전압 V_{cd} 의 합 ($= v_r + V_{cd}$)으로 충전되어 있다.

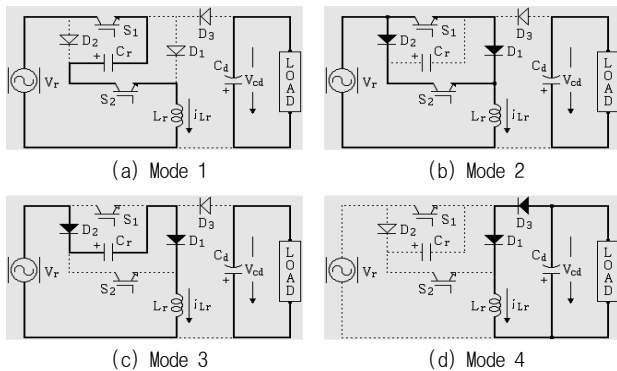


그림 3 스위칭 1주기에 대한 동작모드별 등가회로
Fig. 3 Equivalent circuits in one cycle switching

Mode 1 ($T_1, t_0 \sim t_1$)

시각 t_0 에서 스위치 S_1 과 S_2 를 동시에 턴-온하면, 회로경로는 $v_{r+} - S_1 - C_r - S_2 - L_r - v_{r-}$ 의 직렬 공진회로가 형성된다. 스위치 턴-온 직전의 인덕터 L_r 에 흐르는 전류 i_{Lr} 는 영이므로 S_1 , S_2 는 ZCS로 동작된다. 그리고 공진에 의해 정류기 출력전압 v_r 과 커패시터 충전전압 v_{cr} 와의 합이 인덕터 L_r 에 인가되고 커패시터 C_r 는 방전한다. 공진 인덕터의 저항을 무시하면, 커패시터의 전압 v_{cr} 는 식 (1)과 같이 방전하고 인덕터에 흐르는 전류 i_{Lr} 는 식 (2)와 같이 증가한다. 커패시터 전압이 영으로 되면 이 모드는 끝나며, 식 (3)은 이 모드의 기간이다.

$$v_{cr} = (2v_r + V_{cd}) \cos \omega_r t - v_r \quad (1)$$

$$i_{Lr} = \frac{2v_r + V_{cd}}{X} \sin \omega_r t \quad (2)$$

$$\theta_1 = \omega_r T_1 = \cos^{-1} \frac{v_r}{2v_r + V_{cd}} \quad (3)$$

Mode 2 ($T_2, t_1 \sim t_2$)

이 모드는 커패시터 전압이 영으로 되어 다이오드 D_1 , 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 는 에너지를 축적하며 인덕터 전류 i_{Lr} 는 식 (4)와 같이 직선적으로 증가한다.

$$i_{Lr} = \frac{V_r}{L_r} t + I_1 \quad (4)$$

Mode 3 ($T_3, t_2 \sim t_3$)

시각 t_2 에서 스위치 S_1 , S_2 를 오프하면, 인덕터 전류는 $D_2 - C_r - D_1$ 를 통하여 흐르고 인덕터 L_r 와 커패시터 C_r 는 다시 직렬공진을 하여 C_r 를 충전시킨다. 커패시터와 병렬로 배치된 스위치들의 턴-오프 동작은 공진초기에 커패시터 C_r 의 전압이 영이므로 ZVS로 동작된다. 이 모드에서의 전압 v_{cr} 은 식 (5)와 같으며, 전류 i_{Lr} 는 식 (6)과 같다. 커패시터 전압이 $v_r + V_{cd}$ 로 될 때 이 모드는 끝난다.

$$v_{cr} = v_r + \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} I_a \sin(\omega_r t + \theta) \quad (5)$$

$$i_{Lr} = I_a \cos(\omega_r t + \theta) \quad (6)$$

Mode 4 ($T_4, t_3 \sim t_4$)

커패시터 C_r 의 충전이 끝나면, 인덕터 전류는 다이오드 D_1 과 D_3 을 통하여 부하측으로 전송된다. 이 모드에서 인덕터 전류는 식 (7)과 같이 직선적으로 감소되고 부하측 커패시터 C_d 를 충전시키게 된다. 이 모드는 인덕터 전류가 영으로 되면 끝나고, 제어스위치들은 다음의 턴-온 동작에 대기된다.

$$i_{Lr} = -\frac{V_{cd}}{L_r} t + I_2 \quad (7)$$

3. 시뮬레이션 결과 및 검토

제안한 PFC 스텝 업-다운 초퍼의 동작특성을 확인하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션에 사용된 회로정수들을 표 1에 나타낸다.

표 1 시뮬레이션에 사용된 회로정수
Table 1 Parameters of simulated circuit

| 입력전압 V_{in} | 100V, 60Hz | 출력전압 V_{cd} | 300V |
|---------------|--------------|---------------|--------------|
| 공진인덕터 L_r | 50 μ H | 공진커패시터 C_r | 100 nF |
| 평활 커패시터 C_d | 2000 μ F | 부하저항 R_L | 100 Ω |
| 스위칭 주파수 f_c | 40 kHz | 듀티율 D_c | 30 % |

제어스위치는 가변저항 스위치로 가정하고 그 외 소자는 이상적인 소자로 간주하였다. 제안된 컨버터의 스위칭 동작에 대한 각부의 시뮬레이션 동작파형을 그림 4에 나타낸다. 그림 4에는 스위칭 1주기에 대한 모드별로 공진회로의 인덕터 전류 i_{Lr} 와 커패시터 전압 v_{cr} 그리고 제어스위치의 양단전압 v_{s1} , v_{s2} 와 전류 i_{s1} , i_{s2} 동작파형을 나타낸다. 결과파형을 검토해보

면, 시각 t_0 에서 스위치 S_1, S_2 의 전류는 i_{Lr} 와 같으므로 스위치들의 턴-온 동작은 ZCS로 된다. 시각 t_1 에서 단락회로가 형성되어 인덕터 L_r 의 전류는 직선적으로 증가하며 에너지를 축적한다. 시각 t_2 에서 스위치 S_1, S_2 양단전압은 커패시터 전압과 같으므로 스위치들의 턴-오프 동작은 ZVSO 된다.

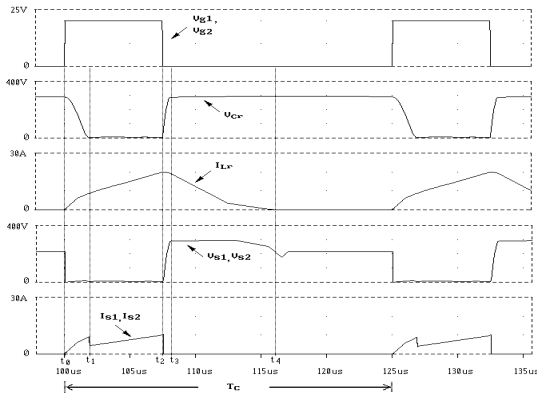
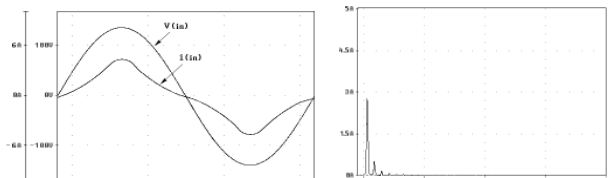


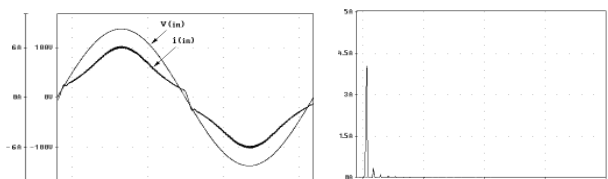
그림 4 스위칭 동작에 대한 시뮬레이션 파형
Fig. 4 Simulation waveforms in one cycle switching

그림 5와 그림 6은 기존의 PFC 컨버터[그림 1]와 제안된 PFC 컨버터에 대해 동일한 회로정수 및 조건에서 측정한 입력 전압과 입력전류 파형 그리고 입력전류에 대한 고조파 성분을 분석하기 위한 주파수 스펙트럼을 보인다. 제안된 PFC 컨버터는 공진용 스너버 커패시터의 충전전류가 입력측으로 유입되어 인덕터에 인가되므로 그림 6처럼 입력전류는 제로 부근에서 상승된 형태를 보이며 더욱 정현파에 더욱 가깝게 된다.



(a) 입력전압 v_{in} 과 입력전류 i_{in} (b) i_{in} 의 주파수 스펙트럼

그림 5 기존의 PFC 컨버터의 파형분석
Fig. 5 Waveform analyses of conventional PFC converter



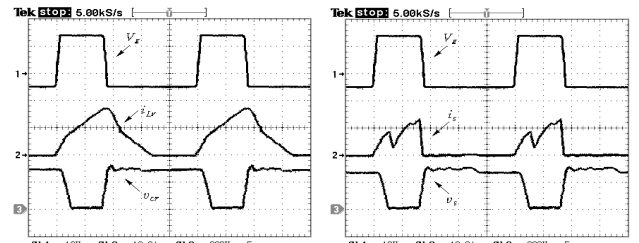
(a) 입력전압 v_{in} 과 입력전류 i_{in} (b) i_{in} 의 주파수 스펙트럼

그림 6 제안된 PFC 컨버터의 파형분석
Fig. 6 Waveform analyses of proposed PFC converter

4. 실험결과 및 검토

실험회로 구성은 전력용량 1.0[kW]급으로 하여 사용된 입력 전원과 수동소자들의 변수들은 표 1에 주어진 값들을 기준하여 설계되었다. 그림 7은 파형분석과 소프트 스위칭동작을 확인하기 위해 듀티율 30[%]의 스위칭 1주기에 대한 인덕터 전류 i_{Lr} , 커패시터 전압 v_{cr} , 스위치 전류 i_s 그리고 스위치 양단전

압 v_s 을 나타낸다. 그림 7(a)에서 공진동작은 공진 1주기 동안 지속적으로 이뤄지지 않고 스위치의 턴-온과 턴-오프에서 부분적인 공진동작을 보인다. 또한 그림 7(b)에서 제어스위치들은 부분공진 동작에 의해 영전류에서 턴-온되고 영전압에서 턴-오프되는 소프트 스위칭 동작을 보인다. 이에 따른 스위칭 손실 감소로 초퍼는 고효율로 동작되었다.



(a) i_{Lr} 와 v_{cr} (b) 스위치 전류 i_s 와 양단전압 v_s

그림 7 스위칭 1주기에 대한 각 부의 실험파형
Fig. 7 Experimental waveforms in one cycle switching

그림 8은 제안된 PFC 컨버터와 기존의 PFC 컨버터에 대해 듀티율 변화에 따른 입력역률의 변화와 출력용량 변화에 따른 효율측정 비교를 나타낸다. 제안된 컨버터는 공진용으로 사용된 스너버 커패시터의 충전전류가 손실 없이 입력측으로 유입되어 높은 역률을 보였으며, 제어스위치의 소프트 스위칭에 의해 상당한 효율증대를 가졌다.

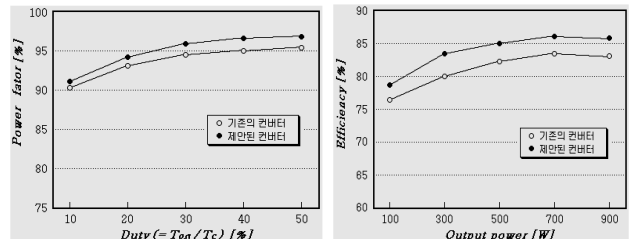


그림 8 입력역률 및 효율 비교
Fig. 8 Comparison of input power factor and efficiency

5. 결론

본 논문에서 제안된 컨버터는 기존의 스너버를 소프트 스위칭을 위한 부분공진 회로로 설계한 새로운 무손실 스너버 회로를 제안하였으며 회로구조가 간단하고 제어방식이 용이하였다. 그리고 소프트 스위칭에 의해 기존의 컨버터에서 나타나는 스너버 손실이 없어 컨버터의 효율이 증대되었다. 제안된 컨버터는 전류불연속 모드의 듀티율 일정 제어에 의해 입력전류를 정현파 입력전압의 크기에 비례한 불연속적인 펄스열의 정현파상으로 만들어 입력역률을 상승시켰으며, 특히 공진용 스너버 커패시터의 축적된 에너지의 입력측 유입으로 인해 저차 고조파 성분이 감소되어 입력역률이 더욱 증대되었다.

참고 문헌

- [1] 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, pp. 928-936, 2004
- [2] 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, pp. 395-404, 2005