

고효율을 갖는 단일 전력변환 직렬 공진형 AC-DC 컨버터

정서광, 조용원, 권봉환
포항공과대학교 전자전기공학과

Single Power-Conversion Series-Resonant AC-DC Converter with High Efficiency

Seo Gwang Jeong, Yong Won Cho, Bong Hwan Kwon

Dept. of Electronic and Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문에서는 입력 직류링크 전해 캐패시터와 power factor correction(PFC) 회로 없이 고효율과 고역률을 갖는 단일 전력 변환 직렬 공진형 AC DC 컨버터를 제안한다. 제안된 컨버터의 1차측은 절연형 single ended primary inductor converter (SEPIC) 컨버터와 스위치의 서지 전압을 최소화하고 영전압 스위칭을 위한 능동 클램프 회로로 구성되어 있다. 2차측은 큰 전압 이득을 위한 배전압 회로로 구성되어 있으며 직렬 공진을 이용하여 다이오드의 영전류 스위칭을 달성함으로써 역방향 회복 문제를 해결 할 수 있다. 또한 별도의 PFC 회로와 입력 직류링크 전해 캐패시터 없이 제안된 역률개선 제어 알고리즘을 이용하여 간단한 구조로 고역률을 달성할 수 있다. 본 논문에서는 제안된 회로의 이론적 해석 및 시작품의 실험을 수행하여 타당성을 검증하였다.

1. 서론

최근 고효율과 고역률을 갖는 AC DC 컨버터에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 SEPIC 컨버터는 입력전류 리플이 작고 넓은 입력전압 범위를 갖는다는 장점 때문에 LED 구동회로 등 많은 산업 분야에서 사용되고 있다.^[1] 하지만 스위치와 다이오드의 하드 스위칭으로 인한 스위칭 손실이 크고 절연형 SEPIC 컨버터의 경우 변압기 누설 인덕턴스에 저장된 에너지에 의한 스위치의 서지 전압이 크다는 단점이 있다. 그리고 입력측의 높은 역률을 얻기 위해 추가적인 PFC 회로와 입력 직류 링크 캐패시터가 필요하다.^[2] 이때 추가되는 PFC 회로와 입력 직류 링크 캐패시터로 인해 컨버터의 효율이 저하될 수 있으며 회로가 복잡해지고 전체 시스템의 가격과 부피가 커질 수 있다.

본 논문에서는 위에 언급된 기존 SEPIC AC DC 컨버터의 문제점을 해결하기 위해 고효율을 갖는 단일 전력변환 직렬 공진형 AC DC 컨버터를 제안한다. 제안된 컨버터는 입력 직류 링크 전해 캐패시터와 추가적인 PFC 회로 없이 제안된 역률개선 제어 알고리즘을 사용하여 단일 전력변환 함으로써 간단한 회로구성 및 고효율, 고역률을 달성할 수 있다.

2. 제안된 단일 전력변환 직렬 공진형 AC-DC 컨버터

2.1 제안된 컨버터의 구성 및 특징

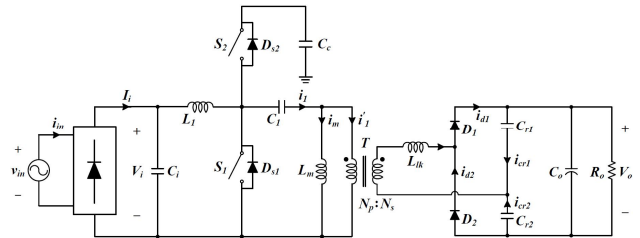


그림 1 제안된 단일 전력변환 직렬 공진형 AC-DC 컨버터
Fig. 1 Proposed single power-conversion series-resonant AC-DC converter

그림 1은 제안된 단일 전력변환 직렬 공진형 AC DC 컨버터이다. 기존의 PFC 회로를 포함한 two stage PFC 컨버터나 single stage PFC 컨버터와는 다르게 추가적인 PFC 회로와 입력 직류 링크 캐패시터가 없는 단순한 구조를 가진다. 제안된 컨버터 변압기의 1차측은 다이오드 정류기와 권선비 $n(N_s/N_p)$ 을 가지는 절연형 SEPIC 컨버터, 능동 클램프 회로, 변압기 자화 인덕턴스 L_m 으로 구성되어있으며 2차측은 공진 캐패시터 C_{r1} , C_{r2} 를 포함하는 배전압 회로와 변압기 누설 인덕턴스 L_k 로 구성되어있다.

기존 SEPIC 컨버터의 1차측에 능동 클램프 회로를 추가함으로써 스위치 S_1 의 서지 전압을 최소화하고 영전압 스위칭을 달성할 수 있으며 변압기 누설 인덕턴스에 저장된 에너지를 재활용 할 수 있다. 2차측에는 배전압 회로를 사용함으로써 낮은 변압기 권선비로 높은 출력전압을 얻을 수 있으며 변압기 이용률을 높일 수 있다. 또한 변압기 누설 인덕턴스 L_k 와 공진 캐패시터 C_{r1} , C_{r2} 의 공진으로 다이오드 D_1 과 D_2 의 영전류 스위칭을 달성함으로써 역방향 회복 문제를 해결하여 고효율을 달성할 수 있다.

2.2 제안된 컨버터의 동작원리

제안된 컨버터의 메인 스위치 S_1 과 능동 클램프 스위치 S_2 는 상보적으로 동작한다. 스위치 S_1 이 on 상태일 때 변압기의 2차측 다이오드 D_2 가 도통되고 변압기 누설 인덕턴스 L_k 와 공진 캐패시터 C_{r1} , C_{r2} 에 의해 직렬 공진이 일어난다. 이 직렬 공진으로 인해 다이오드 D_2 가 턴 오프 되기 전에 다이오드에 흐르는 전류가 먼저 0A가 되므로 영전류 스위칭을 달성할 수 있다. 스위치 S_2 가 on 상태일 때도 같은 원리로 다이오드 D_1 이

도통되고 직렬 공진에 의해 영전류 스위칭을 달성할 수 있다. 또한 스위치 S_1 과 S_2 가 턴 온 되기 전에 각 스위치 양단의 전압이 먼저 0V가 되므로 영전압 스위칭을 달성할 수 있다. 기존의 절연형 SEPIC 컨버터는 스위치가 on 또는 off 상태일 때만 2차측으로 에너지를 전달하는 반면, 제안된 컨버터는 2차측에 배전압 회로를 사용함으로써 스위치가 on 상태일 때와 off 상태일 때 모두 2차측으로 에너지를 전달할 수 있다. 따라서 높은 변압기 이용률을 달성할 수 있으며 낮은 변압기 권선비로 높은 출력전압을 얻을 수 있다.

제안된 컨버터의 입력력 관계식은 변압기 자화 인덕턴스 L_m 의 volt second 평형 조건에 의해 계산될 수 있다. 이때 L_m 이 L_{lk} 에 비해 충분히 크다면 관계식은 아래와 같이 근사될 수 있다.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{n^2 L_m + L_{lk}}{n L_m} \frac{1}{1-D} \approx \frac{n}{1-D} \quad (1)$$

2.3 제안된 컨버터의 제어 알고리즘

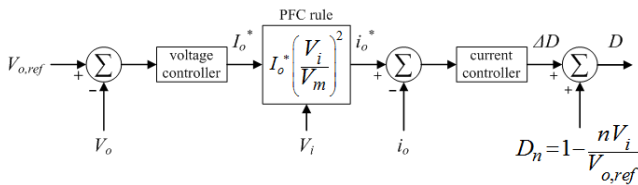


그림 2 제안된 AC-DC 컨버터의 제어 블록 선도
Fig. 2 Control block diagram of proposed AC-DC converter

그림 2는 PFC 회로 없이 고역률을 달성하기 위해 본 논문에서 제안된 역률 제어 알고리즘의 블록 선도이다. 비선형적 관계를 가진 듀티비 D 와 입력전류 I_i 는 제한 선형화를 통해 제어 가능성을 높일 수 있다. 인덕터 L_i 의 volt second 평형 조건을 이용하여 아래와 같이 듀티비가 계산될 수 있다.

$$D = 1 - \frac{n|v_i|}{v_{o,ref}} + L_1 \frac{n}{v_{o,ref} T_s} \Delta i_{L_1} = D_n + \Delta D \quad (2)$$

위의 듀티비 D 는 아래와 같이 공칭 듀티비 D_n 와 듀티비 변화율 ΔD 로 나눌 수 있으며 입력전류의 변화율 $\Delta I_i = \Delta i_{L_1}$ 과 듀티비 변화율 ΔD 가 선형적인 관계를 가지는 것을 확인할 수 있다.

$$D_n = 1 - \frac{n|v_i|}{v_{o,ref}}, \quad \Delta D = L_1 \frac{n}{v_{o,ref} T_s} \Delta i_{L_1} \quad (3)$$

전력 손실이 없고 단위역률을 가지는 이상적인 컨버터로 동작한다면 역률 제어를 위한 기준 출력전류는 아래와 같이 계산될 수 있다.

$$i_o^* = \frac{V_m I_m}{V_{o,ref}} \sin^2 \omega t = I_o^* \left(\frac{V_i}{V_m} \right)^2 \quad (4)$$

따라서 식 (3)과 (4)를 이용하여 그림 2의 역률 제어 알고리즘을 구현할 수 있다. 출력전압 V_o 의 제어를 위해 전압 제어가 사용되며 기준 출력전류의 최대값 I_o^* 가 결정된다. PFC rule을 통해 기준 출력전류 i_o^* 가 계산될 수 있으며 출력전류 i_o 의 제어를 위해 전류 제어를 통해 듀티비 변화율 ΔD 를 구할 수 있다. D_n 과 ΔD 에 의해 입력측의 역률과 출력전압, 출력전류의 제어를 위한 최종 듀티비 D 가 결정된다.

3. 실험 결과 및 분석

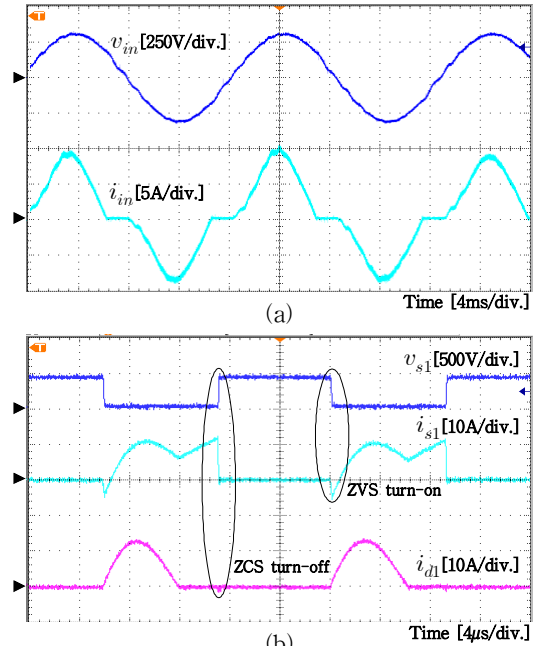


그림 3 제안된 컨버터의 실험파형. (a) 입력전압 및 입력전류 파형. (b) 스위치 S_1 의 영전압 스위칭 및 다이오드 D_1 의 영전류 스위칭.

Fig. 3 Experimental waveforms of the proposed converter. (a) Input voltage and input current. (b) ZVS turn-on of the switch S_1 and ZCS turn-off of the diode D_1 .

본 논문에서는 제안된 회로의 시제품 실험을 수행하여 타당성을 검증하였다. 시제품의 입력전압은 220V_{rms}, 60Hz이며 출력전압은 370V, 정격 전력은 1kW이다. 그림 3은 입력전압과 입력전류, 스위치 S_1 과 다이오드 D_1 의 ZVS 턴 온 동작과 ZCS 턴 오프 동작의 실험파형이다. 측정된 역률은 0.965이며 효율은 94.8%로 제안된 컨버터가 추가적인 PFC 회로 없이 고역률과 고효율을 갖는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 입력 직류 링크 전해 캐패시터와 PFC 회로 없이 고효율 및 고역률을 갖는 단일 전력변환 직렬 공진형 AC DC 컨버터를 제안하였다. 제안된 역률개선 제어 알고리즘을 이용하여 고역률을 달성함으로써 추가적인 PFC 회로를 필요로 하는 기존의 AC DC 컨버터에 비해 간단한 구조를 가지며 소프트 스위칭 기법을 사용하여 스위치의 서지 전압을 줄일 수 있고 스위칭 손실을 최소화함으로써 고효율을 달성할 수 있다.

참고 문헌

- [1] Hongbo Ma and Jih Sheng Lai, "A novel valley fill SEPIC derived power supply without electrolytic Capacitors for LED Lighting Application," IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 6, pp. 3057-3071, Jun. 2012.
- [2] B. Singh and B. N. Singh, "A review of single phase improved power quality AC DC converters," IEEE Trans. Ind. Electron., vol.50, no. 5, pp. 962-981, Oct. 2003.