

새로운 단일전력변환 SEPIC-ZETA 절연형 양방향 컨버터

김준석, 차우준, 권봉환
포항공과대학교 전자전기공학과

A New Single-power-conversion SEPIC-ZETA Isolated Bidirectional Converter

Jun Seok Kim, Woo Jun Cha, Bong Hwan Kwon

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

ABSTRACT

본 논문은 새로운 단일전력변환 SEPIC(Single Ended Primary Inductor Converter) ZETA 절연형 양방향 컨버터를 제안한다. 제안된 컨버터는 SEPIC과 ZETA 컨버터가 결합된 구조로 절연을 통해 안정성을 강화했고, DC측 리플 전류가 낮아 에너지 저장장치의 수명을 연장시킨다. 그리고 SEPIC 컨버터 모드(DC/AC)와 ZETA 컨버터 모드(AC/DC)에서의 입출력 전압비가 동일해 양방향 제어 알고리즘이 간단하다. 또한, 기존 two stage 구성의 양방향 컨버터와 달리 회로가 단순하며, 단일전력변환을 통한 고효율·저비용의 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 이론적 해석 및 제안한 컨버터의 250W급 시작품을 이용한 실험결과를 통해 컨버터의 우수성 및 성능을 검증한다.

1. 서론

최근 ESS(Energy Storage System)가 신재생에너지를 활용한 스마트그리드에서의 핵심 설비기술로 큰 주목을 받게 되면서, 고효율·저비용 양방향 컨버터의 필요성이 함께 증가했다.

일반적으로, AC/DC 양방향 컨버터는 크게 two stage와 single stage로 구분된다. 기존 two stage 컨버터는 PFC(Power Factor Correction)단의 기능을 하는 AC/DC 컨버터와 고주파 DC/DC 컨버터가 결합된 형태로 구성된다. 하지만, 이러한 two stage 컨버터의 경우, 전력손실이 두 단계에 걸쳐 발생하게 되고, 각각의 단계에 해당하는 제어회로가 독립적으로 필요하게 되면서, 컨버터의 부피 및 구성요소 수가 증가해 그에 따른 비용증가가 발생한다.^[1]

Single stage 컨버터의 경우 PFC단의 기능을 하는 AC/DC 컨버터의 스위치와 DC/DC 컨버터의 스위치를 공유함으로써 별도의 회로들을 제거하고, 이를 통해 컨버터의 부피 감소 및 제작비용의 절감 효과를 얻는다. 이때, 플라이백 컨버터는 회로가 간단하고 가격 경쟁력이 높아 저전력용 컨버터로 자주 사용된다. 하지만, 플라이백 컨버터는 큰 리플 전류가 발생되어 배터리, 수퍼캐패시터, 그리고 연료전지 등과 같은 에너지 저장장치들의 수명단축을 초래한다.^[2]

본 논문에서는 앞서 언급한 기존의 two stage 컨버터 및 플라이백 컨버터의 단점들을 개선하고 단일전력변환을 통해 고효율·저비용의 장점을 가지는 단순한 구조의 회로를 제안한다. 제안하는 컨버터는 DC측에 부착되어 있는 인덕터를 통해 리플 전류를 효과적으로 낮추어 에너지 저장장치의 수명을 연장시켜

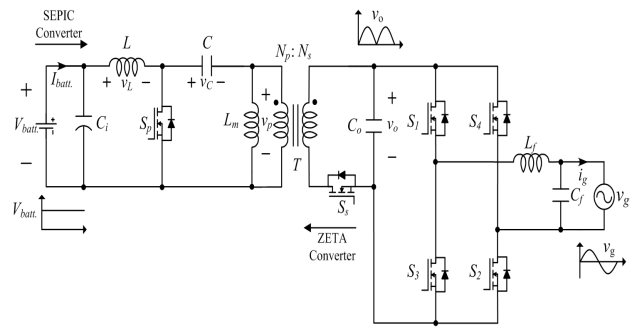


그림 1. 제안하는 단일전력변환 SEPIC-ZETA 절연형 양방향 컨버터
Fig. 1. Proposed single-power-conversion SEPIC-ZETA isolated bidirectional converter

주며, DC측과 AC측간의 절연을 통해 안정성을 강화했다. 최종적으로 250W급 시작품을 완성하였고, 이를 통한 실험결과를 바탕으로 제안하는 컨버터의 우수성 및 성능을 검증한다.

2. 제안하는 SEPIC-ZETA 양방향 컨버터

2.1 제안하는 컨버터의 구성 및 동작원리

그림 1은 제안하는 단일전력변환 SEPIC ZETA 절연형 양방향 컨버터로 두 개의 스위치 S_p , S_s 가 사용된다. 제안된 컨버터의 DC측과 AC측은 각각 SEPIC과 ZETA 컨버터의 입력측과 같은 구조로, 인덕터 L 과 캐패시터 C , 그리고 변압기의 자화인덕터 L_m 로 구성되고, 추가적으로 unfolding회로 및 필터들이 부착됐다. 이때, 인덕터 L 은 DC측 리플 전류를 줄여 에너지 저장장치들의 수명을 연장시켜준다.

제안하는 컨버터는 전류연속모드(Continuous Conduction Mode)에서 DC측과 AC측의 두 스위치 S_p , S_s 가 상보적으로 동작하고, SEPIC 컨버터 모드 또는 ZETA 컨버터 모드로 나뉘어져 구동된다. 또한, 직류전력(DC Power)을 단일 단으로 계통 주파수의 정류된 전파(Full Wave)형태의 전력으로 변환할 수 있고, 반대방향으로의 전력변환도 가능하다.

2.1.1 SEPIC 컨버터 모드

SEPIC 컨버터 모드는 직류전력을 단일 단으로 계통 주파수의 정류된 전파형태의 전력으로 변환시키는 모드로, 스위치 S_p 가 주스위치(Main Switch)로 동작하고, S_s 는 이에 상보적인 주기로 동작된다. 모드분석을 DC 정상상태라는 가정 하에 진행

하고, 입출력 전압비를 구해보면, 키르히호프의 전압법칙 (Kirchhoff's Voltage Law : KVL)에 의해 DC측 루프 평균 전압의 합은 0이다.

$$-V_{batt.} + V_L + V_C + V_p = 0 \quad (1)$$

이때, 정상상태에서 인덕터들의 평균전압은 0V고, 캐패시터 C의 평균전압 V_C 는 아래와 같다.

$$V_C = V_{batt.} \quad (2)$$

인덕터 L에 전압·시간 평형 조건을 적용하여 관계식을 구하면,

$$V_{batt.} - \frac{N_p}{N_s}(1-D_p)V_o - (1-D_p)V_C = 0 \quad (3)$$

$$\frac{V_o}{V_{batt.}} = \frac{nD_p}{1-D_p} \quad (4)$$

임을 알 수 있다($n = N_s/N_p$). D_p 는 스위치 S_p 의 시비율이다.

이 모드에서 스위치 S_p 가 On 되면, 인덕터 L은 배터리로부터 에너지를 저장하게 되고, 변압기의 L_m 은 캐패시터 C에 저장된 에너지를 받게 된다. 스위치 S_p 가 Off되면, L은 C로 에너지를 전달하고, L_m 과 함께 계통에도 에너지를 전달한다.

2.1.2 ZETA 컨버터 모드

ZETA 컨버터 모드의 경우, 계통 주파수의 직류된 전파형태의 전력을 단일 단으로 직류전력으로 변환시키며, 스위치 S_s 를 주스위치로 동작시키고, S_p 가 이에 상보적인 주기로 동작한다. 이 모드도 DC 정상상태이므로 캐패시터 C의 평균전압 V_C 는 SEPIC 컨버터 모드에서와 동일하고, 입출력 전압비를 구하기 위해 인덕터 L에 전압·시간 평형 조건을 적용하여 관계식을 구하면,

$$-V_{batt.} + \frac{N_p}{N_s}D_s V_o + D_s V_C = 0 \quad (5)$$

$$\frac{V_{batt.}}{V_o} = \frac{D_s}{n(1-D_s)} \quad (6)$$

임을 알 수 있다. 이 수식에서 D_s 는 스위치 S_s 의 시비율에 해당한다.

이 모드는 스위치 S_s 가 On 되면, L_m 은 계통으로부터 에너지를 공급받게 되고, C는 L을 통해 저장되어있던 에너지를 배터리로 전달한다. 스위치 S_s 가 Off 되면, 스위치 S_p 가 On되면서 L_m 에 저장되어있던 에너지가 C로 전달되고, L에 있던 에너지가 배터리로 전달된다.

2.1.3 제안하는 컨버터 동작원리

위에서 구한 SEPIC과 ZETA 컨버터 모드의 입출력 전압비를 하나의 주스위치에 대한 식으로 통합하기 위해, ZETA 컨버터 모드에서의 주스위치를 S_p 로 바꿔 시비율을 $D_p(=1 D_s)$ 로 사용하면, 입출력 전압비가 SEPIC 컨버터 모드와 동일하게 되고, 이 값을 전파 형태 $v_o(t)$ 에 대해 쓰면,

$$\frac{v_o(t)}{V_{batt.}} = \frac{nd(t)}{1-d(t)} \quad (7)$$

다. 스위치 S_p 의 시비율은 $d(t)$, 그리고 S_s 는 $1-d(t)$ 가 되어 상보적으로 구동된다.

제안하는 SEPIC ZETA 양방향 컨버터의 경우, DC측에서 AC측으로 에너지가 전달될 때는 SEPIC 컨버터 모드 동작원리에 의해 에너지 전달이 이뤄지며, 반대의 경우는 ZETA 컨버터 모드 동작원리에 의해 에너지가 전달된다.

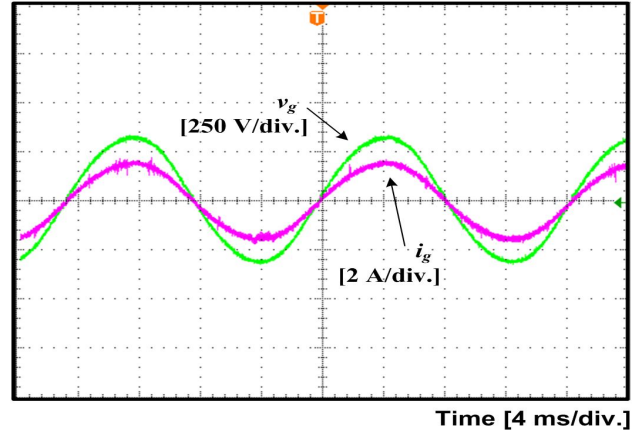


그림 2. 계통전압 v_g 와 계통전류 i_g 파형

Fig. 2. Waveforms of line voltage v_g and line current i_g

3. 실험결과

새로운 단일전력변환 SEPIC ZETA 절연형 양방향 컨버터의 동작 및 성능을 검증하기 위해 250W 시작품을 제작하여 실험을 진행했다. 실험조건은 스위칭 주파수 50kHz, 계통전압 v_g 는 220V_{rms} 60Hz, $V_{batt.}$ 는 60V로 설정했다. 그림 2는 시작품을 통해 얻은 실험결과이며 계통전압 v_g 와 계통전류 i_g 의 파형이다.

표 1. 제안된 컨버터 구동회로의 주요 파라미터 값

파라미터	값	파라미터	값
L	350uH	v_g	220V _{rms} 60Hz
C	6.6uF	f_s	50kHz
L_m	58uF	효율	95%
$V_{batt.}$	60V	$n(=N_s/N_p)$	51/14

4. 결론

본 논문에서는 단일전력변환을 이용하여 고효율·저비용의 장점을 가지는 SEPIC ZETA 절연형 양방향 컨버터를 제안하였다. 제안된 컨버터는 SEPIC과 ZETA 컨버터가 결합되어 있는 형태로, SEPIC 컨버터 모드와 ZETA 컨버터 모드 동작 시 입출력 전압비가 동일하여 제어가 쉽고, 리플 전류를 효과적으로 낮추어 DC측에 연결된 에너지 저장장치의 수명을 연장시킬 뿐만 아니라, 250W급 양방향 컨버터의 하드웨어 구현을 통해 95%의 고효율을 달성했다.

참고 문헌

- [1] J. Zhang, M. M. Jovanovic, and F. C. Lee, "Comparison between CCM single stage and two stage boost PFC converters," in Proc. IEEE APEC 1999, pp. 335-341.
- [2] X. Kong and A. M. Khambadkone, "Analysis and implementation of a high efficiency, interleaved current fed full bridge converter for fuel cell system," IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 2, pp. 543-550, Mar. 2007.