

PV 시스템의 차동 전력 조절기 모듈용 양방향 플라이백 컨버터 설계 방법

박승빈, 김민아, 정지훈
울산과학기술원(UNIST)

Design Consideration of Bidirectional Flyback Converter for PV Differential Power Processing Modules

Seungbin Park, Mina Kim, Jee Hoon Jung
Ulsan National Institute of Science and Technology(UNIST)

ABSTRACT

양방향 플라이백 컨버터는 1, 2차 간 절연이 가능하고, 양방향 전력전달을 할 수 있으며, 전력밀도가 높기 때문에 PV 용 차동 전력 조절기 (DPP) 모듈의 응용분야에 적합하다. 차동 전력 조절기 모듈 용 플라이백 컨버터는 양방향 동작을 위해 1, 2차 측 모두 능동 소자 및 스너버 회로로 구성 되어있다. 그러나 양방향 동작을 위해 추가된 회로는 플라이백 컨버터의 효율을 감소시키기 때문에 고효율의 양방향 플라이백 컨버터를 설계하기 위해서는 기존의 플라이백 컨버터와는 다른 설계 고려 사항들이 존재한다. 본 논문에서는 양방향 플라이백 컨버터의 각 소자별 손실을 고려하여 정격 부하 시 정방향 동작과 역방향 동작의 최대 효율을 얻을 수 있는 변압기의 자화 인덕턴스의 값을 제시한다. 본 설계 방법은 25 W 급 양방향 플라이백 컨버터 시작품을 이용하여 정격부하에서 전력변환 효율과 설계의 타당성을 실험적으로 검증하였다.

1. 서론

최근 세계적으로 증가하고 있는 에너지 수요와 더불어 화석 연료의 고갈과 그에 따른 환경오염으로 인하여 신재생에너지의 관심이 증가하고 있다. 그 중에서도 태양광발전(Photovoltaic, PV)은 장소에 구애받지 않고 어디서나 효율적인 발전을 할 수 있어 수요가 증가하고 있다. 하지만 태양광 발전은 출력전압이 낮기 때문에 직렬연결이 요구되는데, 기존의 직렬연결 시스템은 태양광 패널에 일사량이 불균일하면 효율이 급격하게 감소하게 된다. 이에 대한 해결책으로 태양광 시스템에 불균일한 일사량이 들어오게 되어도 기존의 직렬연결 시스템 보다 높은 효율을 낼 수 있는 차동전력 조절기(Differential Power Processing, DPP) 시스템이 제시 되었다.^[1]

차동 전력 조절기 시스템은 불균일한 일사량으로 인한 태양광 패널의 전력 편차를 차동 컨버터를 이용해 상쇄시켜 각 태양광 패널의 최대 전력 점에서 동작 하게 한다. 하지만 이 차동 컨버터는 양방향 전력 전달, 높은 전력밀도, 고효율을 요구하기 때문에 차동 전력 조절기 시스템에서 차동 컨버터의 성능과 설계는 매우 중요하다. 그림 1은 PV to bus 배열 차동 전력 조절기^[2] 모듈용 차동 컨버터 시스템을 나타낸다.

본 논문에서는 양방향 PV to bus 배열 차동 전력 조절기 모듈용 차동 컨버터에 적합한 양방향 플라이백 컨버터의 설계 방법을 제안하고자 한다. 각 소자별 손실을 고려하여 정격 부

하 시 정방향 동작과 역방향 동작의 최대 효율을 얻을 수 있는 변압기의 자화 인덕턴스의 값을 설계한다. 본 설계 방법은 25 W 급 양방향 플라이백 컨버터 시작품을 이용하여 검증하였다.

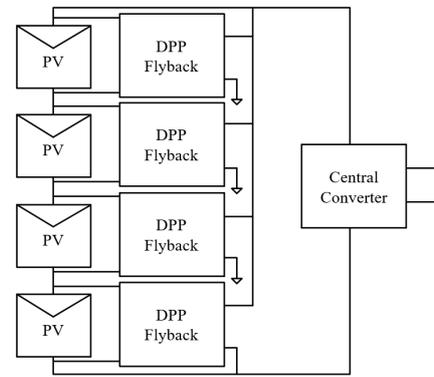


그림 1 PV to bus 배열 차동 전력 조절기 모듈 구성도
Fig.1 Configuration diagram of PV to bus differential power processing modules

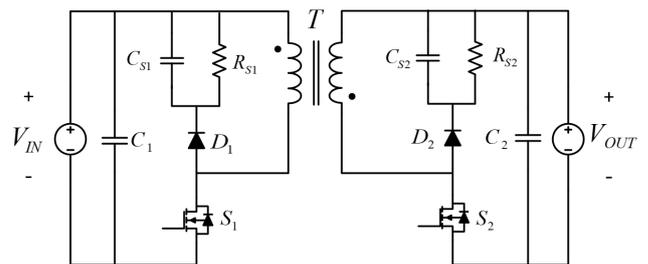


그림 2 양방향 플라이백 컨버터 회로 구조
Fig.2 Schematic of the bidirectional flyback converter

2. 양방향 플라이백 컨버터 설계

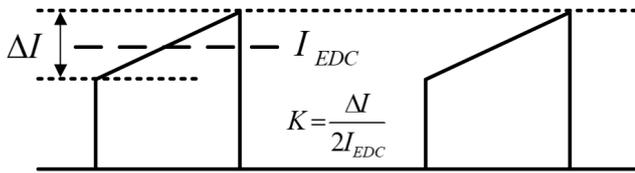
2.1 양방향 플라이백 컨버터 회로 구조

그림 2는 양방향 플라이백 컨버터의 회로구조를 나타낸다. T는 컨버터의 주 변압기이고 S₁와 S₂는 컨버터의 주 스위치를 나타낸다. 변압기 T의 턴 수비는 n이다. R_{S1}과 C_{S1}, D₁은 컨버터의 정 방향 동작 시 변압기 T의 누설 인덕턴스에 남아

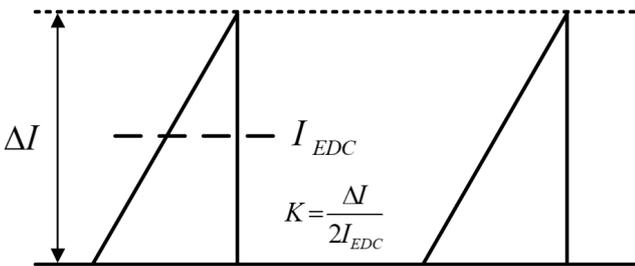
있는 에너지에 의해 스위치 S_1 턴 오프 시에 발생하는 고전압 스파이크로부터 스위치 S_1 을 보호하는 RCD 스너버 회로를 구성한다. 마찬가지로 R_{S2} 과 C_{S2}, D_2 은 컨버터의 역 방향 동작 시 변압기 T의 누설 인덕턴스에 남아있는 에너지에 의해 스위치 S_2 턴 오프 시에 발생하는 고전압 스파이크로부터 스위치 S_2 을 보호하는 RCD 스너버 회로를 구성한다.

2.2 양방향 플라이백 컨버터 설계 방법

플라이백 컨버터의 전력 변환 효율은 변압기의 자화 인덕턴스 값에 의해 달라진다. 그림 3에 따르면 자화 인덕턴스의 값은 입력 측의 스위치 전류의 파형을 변화시킨다. 이는 전류의 실효값과 최댓값의 크기를 변화하게 하여 같은 양의 전력에서도 도통 손실 및 효율의 변화를 야기한다. 또한 자화 인덕턴스는 연속 전류 모드와 불연속 전류 모드를 결정한다.



(a) 연속 전류 모드 : $K < 1$



(b) 불연속 전류 모드 : $K = 1$

그림 3 자화 인덕턴스 값에 따른 전류 파형

Fig.3 Current waveform according to magnetizing inductance value

그림 2의 양방향 플라이백 컨버터 회로 구조에서는 일반적인 플라이백 컨버터와 다르게 양방향 동작을 위해 출력 측에 다이오드가 아닌 스위치로 되어있다. 출력 측의 스위치는 턴 오프상태로 역병렬 다이오드로만 동작하게 되는데, 능동 소자의 바디 다이오드는 역회복 특성이 매우 좋지 않다. 이러한 특성 때문에 출력 측 바디 다이오드에 전류가 흐르는 상황에서 입력 측 스위치가 턴 온을 하는 연속 전류 모드로 설계를 하게 되면 출력 측 바디 다이오드에 역회복 손실과 큰 리플이 발생한다. 따라서 출력 바디 다이오드의 전류가 0 일 때 입력 스위치가 턴 온 하는 불연속 전류 모드로 동작하도록 설계하는 것이 유리하다. 플라이백 컨버터의 변압기의 자화 인덕턴스(L_m)의 설계 식은 다음과 같다.

$$L_m = \frac{(V_{in} \cdot D)^2}{2P_{in}f_s K}, K = \frac{\Delta I}{2I_{EDC}} \quad (1)$$

V_{in} 은 입력 전압, P_{in} 은 입력 전력, f_s 는 스위칭 주파수,

D 는 듀티 비, I_{EDC} 는 ΔI 의 중간 전류 값, K 는 그림 3에 나타난 것과 같이 전류 파형을 결정하는 상수이다. V_{in} , P_{in} , f_s 는 설계의 요구 조건에 의해 결정된다. 불연속 전류 모드에서는 $K = 1$ 이기 때문에 정격 부하에서의 D 의 값을 설정하여 L_m 의 값을 얻을 수 있다.

최적의 L_m 값을 구하기 위해서 L_m 의 값에 따른 스위치 도통 손실, 스너버 손실, 변압기 동손, 스위칭 손실, 출력 측 다이오드 도통 손실을 계산하여 그래프를 얻는다. 계산과정은 다음과 각 손실의 계산식은 다음과 같다.

$$I_{average} = 0.5 D I_{peak} \quad (2)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\int_0^D \left(\frac{I_{peak}}{D} x \right)^2 dx} = \frac{I_{peak} D}{3} \quad (3)$$

$$P_{Conduction, switch} = I_{rms}^2 R_{ds} \quad (4)$$

$$P_{Snubber} = \frac{1}{2} L_{lk} I_{peak}^2 \frac{V_{sn}}{V_{sn} - \frac{V_{out}}{n}} f_s \quad (5)$$

$$P_{Copper} = I_{rms}^2 R_{copper} \quad (6)$$

$$P_{Diode} = V_f \frac{I_{average}}{n} \quad (7)$$

$$P_{switching} = \frac{1}{2} I_{peak} \left(V_{in} + \frac{V_{out}}{n} \right) f_s t_{off} \quad (8)$$

I_{rms} 는 스위치 전류 실효값, R_{ds} 는 스위치의 온 저항, L_{lk} 는 누설 인덕턴스, I_{peak} 는 스위치 전류 최댓값, R_{copper} 는 변압기 저항, V_{sn} 은 스너버 전압, n 은 변압기 턴수 비, $I_{average}$ 는 입력 평균 전류, V_f 는 다이오드 문턱 전압, t_{off} 는 턴 오프 시간이다.

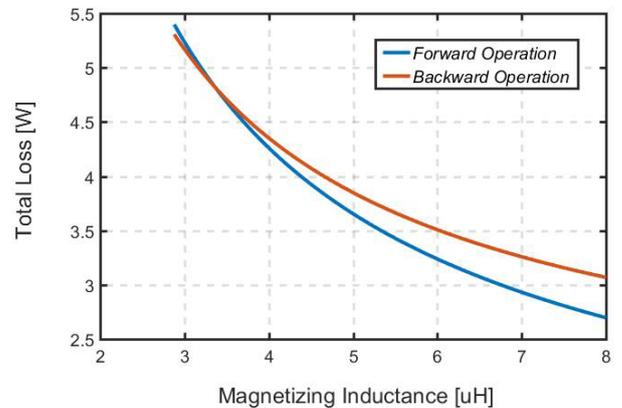


그림 4 불연속 전류 모드에서의 자화 인덕턴스에 따른 손실 곡선
Fig.4 Loss curve according to magnetizing inductance at discontinuous conduction mode (DCM)

위의 계산식에 따른 손실을 각 L_m 값에 따라 그리면 그림 4와 같다. 불연속 전류 모드에서 D 를 낮게 설정하여 낮은 L_m 값으로 설계 하게 되면 식 (4), (5)와 같이 스위치의 전류의 실효값과 최댓값이 커지기 때문에 스위치의 도통 손실과 스너버 손실이 증가 하여 L_m 값이 줄어들수록 전체 손실이 줄어드는 그래프가 그려진다. 따라서 불연속 전류 모드에서 L_m 의 값이 가장 큰 경계점 도통 모드에서의 L_m 값으로 설계를 하는 것이 정방향과 역방향 동작에서 모두 유리하다. 하지만 회로의 손실 분들을 고려하여 전 부하 영역에서 전류 불연속 모드로 동작시키기 위하여 약간의 여유를 두고 경계점 도통 모드와 근접한 불연속 전류 모드의 자화 인덕턴스 값을 선정해야 한다.

2.3 실험 결과

제한한 설계 방법은 25 W급 시작품을 구현하여 실험적으로 검증하였다. 표 1은 구현한 양방향 플라이백 컨버터의 주요 실험 파라미터이다. 그림 5는 양방향 플라이백 컨버터의 정격 부하에서의 정방향 동작 실험 파형이다. 그림 6는 양방향 플라이백 컨버터의 정격 부하에서의 역방향 동작 실험 파형이다. 그림 7은 양방향 플라이백 컨버터의 전 부하 효율 그래프이다. 25 W 정격 부하에서의 효율은 정방향 동작이 87.1 %, 역방향 동작이 84.3 % 으로 측정된다. 역방향 동작에서는 출력측이 저압이기 때문에 비교적 높은 값의 전류가 다이오드로 도통되고, 출력 측 스너버의 저항 값이 작기 때문에 역방향 효율이 정방향 효율에 비해 낮게 측정 되었다.

표 1 양방향 플라이백 컨버터의 주요 실험 파라미터
Table 1 Key experimental parameter of the bidirectional flyback converter

V_{in}	Input voltage	12.8 V
V_{out}	Output voltage	51.2 V
P_{in}	Input power	25 W
n	Turns ratio	4
L_m	Magnetizing inductance	6.6 μ H
C_{S1}	Primary snubber capacitor	300 nF
C_{S2}	Secondary snubber capacitor	10 nF
R_{S1}	Primary snubber resistor	470 Ω
R_{S2}	Secondary snubber resistor	25 k Ω
f_s	Switching frequency	100 kHz

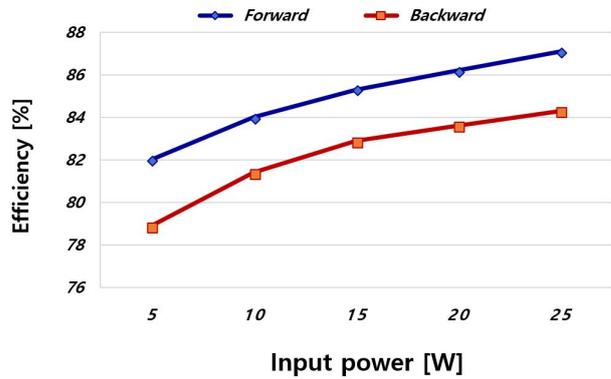


그림 7 제안한 컨버터의 효율 곡선
Fig.7 Efficiency curve of proposed converter

3. 결론

양방향 플라이백 컨버터는 1, 2차 간 절연이 가능하고, 양방향 전력전달을 할 수 있으며, 전력밀도가 높아 PV 용 차동 전력 조절기 모듈의 응용분야에 적합하다. 본 논문에서는 PV to bus 배열 차동 전력 조절기 모듈용 차동 컨버터에 적합한 양방향 플라이백 컨버터의 설계 방법을 제안하였다. 제안된 설계 방법은 25 W 급 양방향 플라이백 컨버터 시작품을 이용하여 정격부하에서 전력변환 효율과 설계의 타당성을 실험적으로 검증하였다

이 논문은 2018년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구 사업임(2016R1A2B4011934)

참고 문헌

- [1] K. A. Kim; et al. "Converter Rating Analysis for Photovoltaic Differential Power Processing Systems," IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 4, pp. 1987-1997, April 2015.
- [2] Guanying Chu, Huiqing Wen, Lin Jiang, Yihua Hu, Xingshuo Li, "Bidirectional flyback based isolated port submodule differential power processing optimizer for photovoltaic applications," Solar Energy, Volume 158, Pages 929-940, 2017

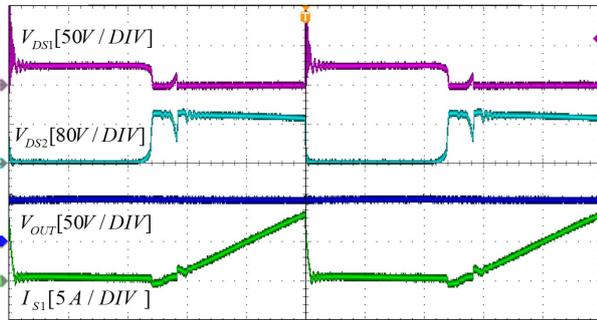


그림 5 정방향 동작 실험 파형
Fig.5 Experimental waveform of forward operation

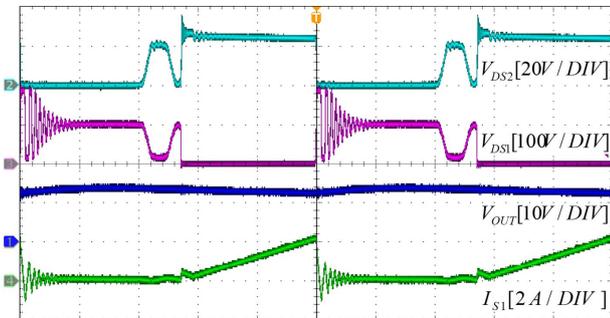


그림 6 역방향 동작 실험 파형
Fig.6 Experimental waveform of backward operation