

태양광 AC 모듈의 능동 디커플링을 위한 양방향 DC-DC 컨버터의 공진 소자 설계

김미나*, 노용수*, 김준구*, 이태원**, 정용채***, 원충연*
 성균관대학교* 삼성전기** 남서울대학교***

Resonance Device Design of Bidirectional DC-DC Converter for Active Power Decoupling of Photovoltaic AC Module

Mi-Na Kim*, Yong-Su Noh*, Jun-Gu Kim*, Tae-Won Lee**, Yong-Chae Jung***, Chung-Yuen Won*
 Sungkyunkwan University* Samsung Electro-mechanics** Namseoul University***

ABSTRACT

In the AC module system, mismatch problem between AC power and constant input power is occurred. To solve this problem, electrolytic capacitor is utilized for diminishing power pulsation in PV side. However, it has disadvantages of low life span and weak in temperature. Decoupling method has been studied to reduce the capacitance and replaces electrolytic capacitor to film capacitor. This paper proposes design method for decoupling circuit which bidirectional DC DC converter using soft switching. Proposed system is verified by design optimization and simulation results.

1. 서론

최근 태양광 발전 시스템에서, 태양 전지 모듈마다 설치되어 발전을 하는 태양광 모듈 집적형 컨버터(PV MIC) 구조가 각광 받고 있다. 그 중 AC 모듈은 각각 최대 전력점 추종 제어를 통하여 부분 음영 등에 의한 출력 저하에도 전체 시스템 효율 감소를 최소화 할 수 있다. 그러나 일반적인 AC 모듈은 PV(Photovoltaic) 패널의 직류 전원과 시변하는 계통 전력에 의하여 컨버터 입력 측에 커플링 현상이 발생하게 된다. 따라서 일반적으로 AC 모듈의 안정적인 최대 전력 추종 제어를 하기 위해 큰 커패시턴스를 갖는 전해 커패시터를 사용하여 리플을 저감시킨다. 하지만 전해 커패시터는 PV 패널에 비하여 수명이 짧고 온도에 따라 특성 변동이 심하다는 단점이 있다. 따라서 커패시턴스를 낮춰 수명이 길고 온도 변화에 강한 필름 커패시터로 대체 할 수 있는 디커플링 기법이 연구되고 있다^[1].

기존의 양방향 벡 부스트 컨버터 토폴로지를 활용한 디커플링 회로는 하드 스위칭으로 인한 스위칭 손실이 발생하며 히스테리시스 전류 제어 방식을 적용하였기 때문에 모드 전환 시 높은 주파수가 요구되어 제어에 어려움이 있다^[2].

본 논문에서는 디커플링을 위한 공진형 양방향 벡 부스트 컨버터의 공진 소자 설계법을 제안한다. 제안된 회로는 기존의 양방향 벡 부스트 컨버터에 공진 인덕터와 공진 커패시터를 추가하여 소프트 스위칭을 통해 손실을 저감한다. 또한 제안된 회로는 AC 모듈과 독립적으로 동작 및 제어가 가능하다. 제안하는 디커플링 회로는 적은 소자 수와 높은 효율의 장점으로 태양광 발전 시스템에 많이 활용되는 단상 플라이백 인버터에 적용하여 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 제안하는 능동 디커플링 회로의 동작원리

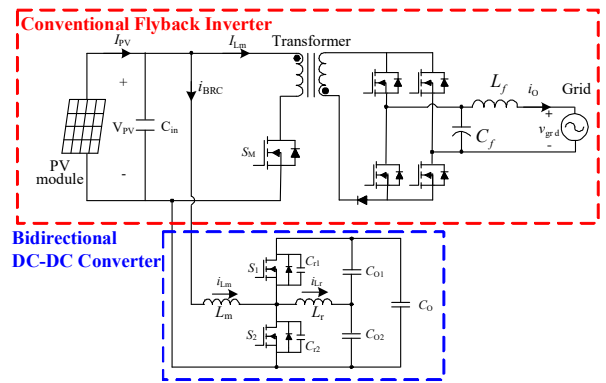


그림 1 제안된 디커플링 회로를 적용한 플라이백 인버터
 Fig. 1 Flyback inverter with proposed decoupling circuit

그림 1의 제안하는 능동 디커플링 회로는 추가된 공진 인덕터 L_r 과 스위치 S_1, S_2 에 병렬 연결된 C_{r1}, C_{r2} 의 공진을 통하여 소프트 스위칭을 한다. 제안된 디커플링 회로는 독립적으로 동작하므로 기존 플라이백 인버터 제어 방식에 영향을 주지 않고 전류 제어가 가능하다. 동작 모드는 크게 벡 모드와 부스트 모드로 나눌 수 있다. 부스트 모드는 PV 단의 잉여 에너지를 C_0 에 저장하는 모드이며, 벡 모드는 C_0 에 저장된 에너지를 방전하여 PV 단으로 부족한 에너지를 보상하는 모드이다.

3. 능동 디커플링 회로의 공진 소자 설계

그림 2는 부스트 모드의 주 인덕터 전류, 공진 인덕터 전류, 스위치의 전압과 전류, 게이트 신호 파형이다. 그림 2에서의 8개의 모드 중 소프트 스위칭 조건이 발생하는 모드는 모드 1과 5이다. 이 모드는 스위치 S_1, S_2 의 게이트 신호가 오프가 되면 시작된다. 모드 5에서의 동작은 스위치 S_2 의 전압이 하강하면 공진 커패시터 C_{r2} 의 전류가 하강하고 공진 커패시터 C_{r1} 의 전류는 상승한다. 공진 조건이 만족하면 먼저 스위치 S_2 의 역병렬 다이오드를 통하여 전류가 도통되므로 스위치 S_2 는 영전압 턴 온이 된다. 이는 벡 모드에서도 동일하게 나타나며, 이와 같은 공진 커패시터와 공진 인덕터의 공진을 통하여 스위치 S_1 과 S_2 는 소프트 스위칭을 하게 된다.

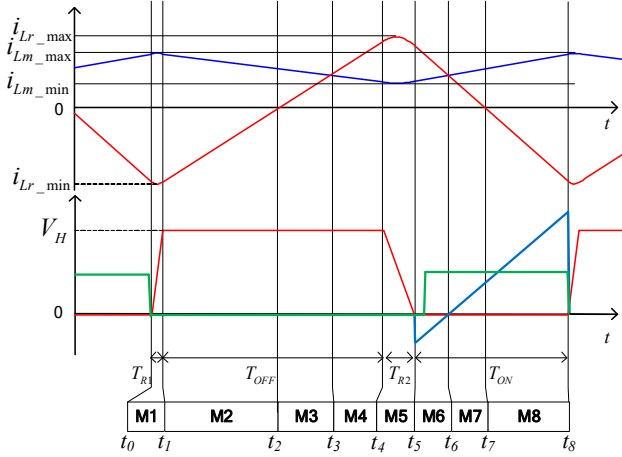


그림 2 부스트 모드의 전압 전류 파형
Fig. 2 Theoretical voltage and current for buck mode operation

소프트 스위칭을 위해 ZVS 영역이 확보되기 위해서는 공진 모드에서 식 (1)과 같이 i_{Lr_max} 가 i_{Lm_max} 보다 커야 한다. 또한 i_{Lr_max} 와 i_{Lm_max} 의 차이에 따라 소프트 스위칭이 가능한 모드 5의 시간이 결정된다. 식 (1)을 바탕으로 ZVS 영역을 확보하기 위한 회로의 파라미터 값은 식 (2)를 통해 식 (3)과 같이 유도된다.

$$i_{Lr_max} > i_{Lm_max} \quad (1)$$

$$i_{Lm_min} + \frac{V_H}{Z_r} > i_{Lm_min} + \frac{V_L}{L_m} T_{ON} \quad (2)$$

$$\frac{V_H}{Z_r} > \frac{V_L}{L_m} T_{ON} \quad (3)$$

$$i_{Lr_max} = K i_{Lm_max} \quad (K = 1.1, 1.2, 1.3, \dots) \quad (4)$$

식 (3)의 조건은 간단한 비례 상수 K 로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며 K 값이 커지면 i_{Lr} 의 전류가 커지기 때문에 스위칭 손실이 증가 한다. 반면에 K 가 작을수록 ZVS 영역이 좁아지기 때문에 제어가 어려워진다. 또한 K 값에 따라 공진 임피던스 Z_r 이 결정되며 식 (5)와 같다.

$$Z_r = \frac{V_H}{K i_{Lm_min}} \quad (5)$$

식 (5)를 이용하여 구한 공진 임피던스로 공진 커패시턴스 C_r 을 구할 수 있으며 식 (6)과 같다. 이 때, f_r 은 스위칭 주파수보다 빠른 주파수를 선정해야 한다.

$$C_r = \frac{1}{2\pi f_r Z_r} \quad (f_r = 1.5F_{sw}, 2F_{sw}, 2.5F_{sw}, 3F_{sw}, \dots) \quad (6)$$

식 (6)을 통해 공진 커패시턴스가 결정되면 식 (7)을 통해 Z_r 과 C_r 에 따라 공진 인덕터 L_r 값을 구할 수 있다.

$$L_r = Z_r^2 C_r \quad (7)$$

3. 실험결과

시뮬레이션에 사용된 플라이백 인버터와 제안된 디커플링 회로의 파라미터 값은 표 1과 같다. $K=1.8$, $f_r=3.3F_{sw}$ 로 결정하여 식(6)과 식(7)을 통하여 공진 소자를 사용하였다. 부스트 모드의 시뮬레이션 파형 그림 3 (a)를 통해 ZVS 영역이 확보되기 위한 공진 인덕터 전류와 주 인덕터 전류의 비율이 설정한 K 값 이상임을 확인하였다. 그림 3 (b)와 (c)에서 공진구간동안 스위치 S_2 의 전압이 하강하고 진 커패시터에서 에너지가 방전되는 것을 확인하였다. 또한 스위치의 전류가 스위치 역병렬 다이오드를 통해 흘러 스위치가 ZVS 턴 온 됨을 알 수 있다.

표 1 제안된 회로의 파라미터
Table 1 Parameters of proposed circuit

파라미터	값	파라미터	값
정격 전력	250 [W]	입력 커패시터	150[μF]
스위칭 주파수	200 [kHz]	디커플링 커패시터	C_{O1}, C_{O2} 50[μF]
입력 전압 리플	1 [V]	C_O	100[μF]
주 인덕터	60.8[μH]	공진 캐패시터	10 [nF]
공진 인덕터	2.8[μH]		

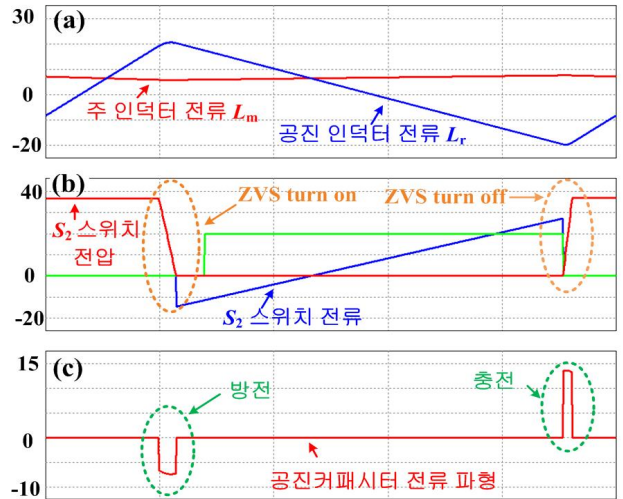


그림 3 부스트 모드에서의 소프트 스위칭 파형
Fig. 3 Soft switching waveforms of APD BRC boost mode main switch

5. 결론

본 논문에서는 디커플링을 위한 공진형 양방향 벡 부스트 컨버터의 공진 소자 설계 법을 제안하였다. 공진형 양방향 벡 부스트 컨버터에서 소프트 스위칭이 가능하도록 ZVS영역을 결정하였으며, 단상 플라이백 인버터에 적용하여 커패시터의 커패시턴스 값을 낮추어 전해 커패시터를 필름 커패시터로 교체하였으며 이를 설계 수식과 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

이 논문은 삼성전기의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

[1] Haibing Hu, Souhib Harb, Nasser Kutkut, Issa Batarseh, Z. John Shen "Power Decoupling Techniques for Micro inverters in PV Systems a Review", ECCE, pp. 3235-3240, 2010. Sept.
[2] A.C. Kyritsis, N.P. Papanikolaou, E.C. Tatakis, "A novel Parallel Active Filter for Current Pulsation Smoothing on Single Stage Grid connected AC PV Modules" Power Electronics and Applications EPE, pp. 1-10, 2007. Sept.