

소프트 스위칭 기능을 갖춘 양방향 직렬 공진형 컨버터

박화평, 정지훈
울산과학기술원 (유니스트)

Bidirectional Series Resonant Converter with Soft Switching Capability

Hwa Pyeong Park and Jee Hoon Jung
Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

ABSTRACT

1차와 2차측의 위상 변조를 이용하는 Dual Active Bridge (DAB) 형태의 직렬 공진형 양방향 컨버터는 이미 구현되었다. 하지만 이는 좁은 영전압 스위칭 범위를 가지고 경부하시 전력 변환 효율을 떨어뜨린다. 본 논문은 Simple Phase Shift (SPS)와 Extended Phase Shift (EPS)를 사용하는 양방향 직렬 공진형 컨버터를 제안하고 이를 이용하여 전부하 구간동안 소프트 스위칭을 얻고자 한다. 정방향 및 역방향 전력 변환에 따른 영전압 스위칭의 조건을 분석하고 공진 탱크와 제어 자유도를 조절 방법에 대해 분석하고자 한다. 제안하는 분석 및 디자인 방법은 500 W 직렬 공진형 컨버터를 통해 검증하였다.

1. 서론

최근 태양광, 풍력, 조수 에너지와 같은 지속 가능한 에너지 원들이 기존의 화석에너지를 대체할 친환경 에너지로 주목을 받고 있다 [1]. 이러한 에너지원들은 향후 미래의 전기 에너지의 많은 부분을 차지할 것으로 예측된다. 이러한 신재생 에너지원들은 DC 마이크로 그리드와 연계하여 다양한 어플리케이션에 전력을 공급할 수 있다. 특히 양방향 DC/DC 컨버터는 DC 그리드와 배터리, DC 모터, 전기 자동차, AC 계통을 연계하는 양방향 인버터 등의 다양한 어플리케이션에 양방향으로 전력을 공급해 줄 수 있다. 따라서 양방향 DC/DC 컨버터는 높은 전력 변환 효율 및 안정성이 요구된다.

기존의 DAB 컨버터는 전압 이득이 1이고 변압기의 턴 비가 전압이득이 1이 되도록 이상적으로 설계된 경우 전부하 영역에서 영전압 스위칭이 가능하고 RMS 전류가 작기 때문에 양방향 전력 변환에 유리하다. 하지만 전압 이득이 1에서 벗어나면 경부하시 영전압 스위칭이 불가능하고 전류의 파형이 삼각파와 같이 나오기 때문에 RMS 전류가 커지게 된다. 이를 해결하기 위해 EPS, Dual Phase Shift (DPS), Triple Phase Shift (TPS)와 같이 복잡한 제어 방법이 제안된다. 이러한 방법은 기존의 SPS보다는 순환 전류를 줄일 수 있지만 전압이득이 1에서 떨어질수록 전류의 RMS 및 피크 전류는 커진다.

기존의 DAB 구조의 직렬 공진형 컨버터는 사인파의 형태로 공진 전류가 형성되기 때문에 전압이득에 전류 RMS가 큰 영향을 받지 않는다. 따라서 배터리 충전 장치와 같은 전압 이득이 충전 상태에 따라 변동하는 어플리케이션에서 유리하다. 하지만 DAB 형태의 직렬 공진형 컨버터는 정방향 및 역방향 전

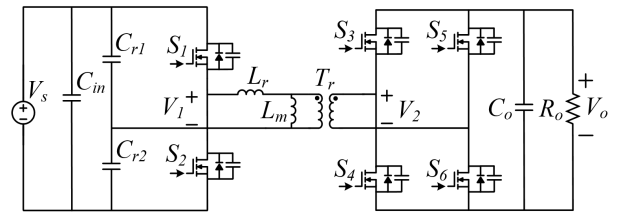


그림 1 양방향 직렬 공진형 컨버터의 모델
Fig. 1 Schematic of the series resonant converter

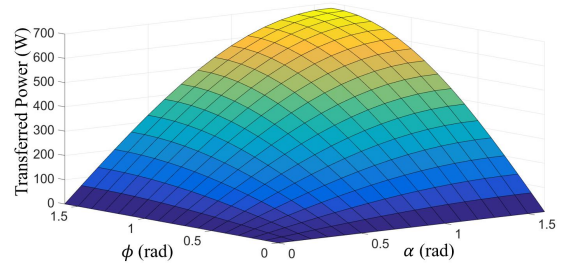


그림 2 제어 변수에 따른 전달 전력
Fig. 2 Power transmission according to the alpha and theta

력 전달 방향에 따라 영전압 스위칭의 조건이 달라진다. 따라서 본 논문은 전력 전달 방향에 따른 영전압 스위칭의 조건을 분석하고 부하의 전영역에서 영전압 스위칭을 가능하게 하는 제어 방법을 제시하고자 한다.

2. 양방향 직렬 공진형 컨버터의 ZVS 조건 분석

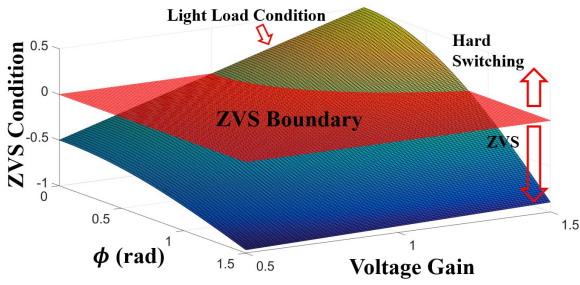
제안하는 양방향 직렬 공진형 컨버터는 그림 1과 같이 나타낼 수 있으며 이는 그림 2와 같이 제어 변수에 따른 전력 전달을 나타낸다. 정방향 및 역방향 전력 제어에 따른 전달되는 전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f = \frac{4nV_{in}V_{out}}{\pi^2} \sin(\phi) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{f_n}{1-f_n^2} \frac{1}{Z_o} \quad (1)$$

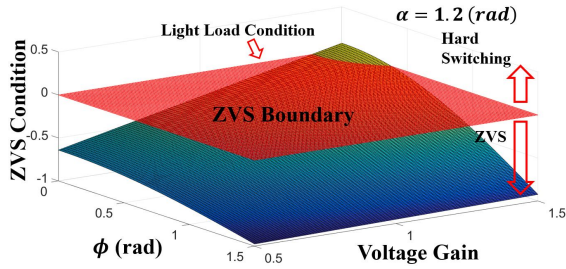
$$P_b = \frac{4nV_{in}V_{out}}{\pi^2} \sin(\phi) \frac{f_n}{1-f_n^2} \frac{1}{Z_o} \quad (2)$$

V_{in} 은 입력 전압, V_{out} 은 출력 전압, n 은 턴 비, f_n 은 정규화된 스위칭 주파수, Z_o 는 $\sqrt{L_r/C_r}$, α 는 2차측의 위상 제어 변수, ϕ 는 1차 및 2차간의 위상 제어 변수이다.

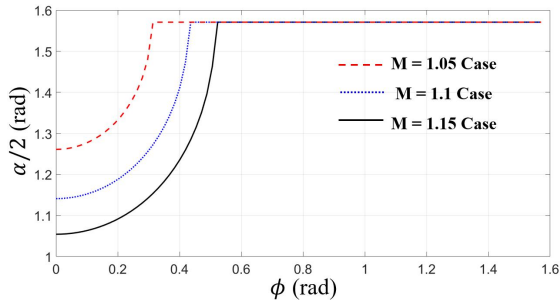
정방향 전력 전달 시 1차측 스위치의 영전압 스위칭 조건은



(a)



(b)



(c)

그림 3 정방향 전력 변환 시 제어 방법에 따른 1차측 스위치의 영전압 스위칭 조건: (a) SPS, (b) EPS, (c) EPS 동작 궤도

Fig. 3 ZVS condition of the primary side switch for forward power flow: (a) SPS, (b) EPS, (c) Operational trajectory of EPS

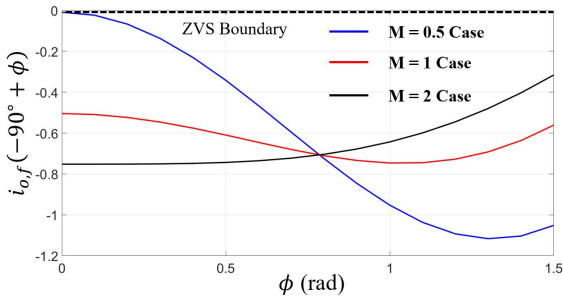
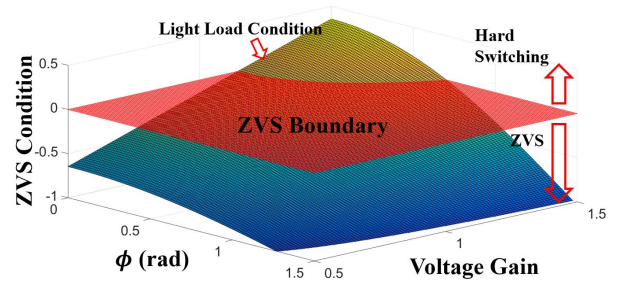
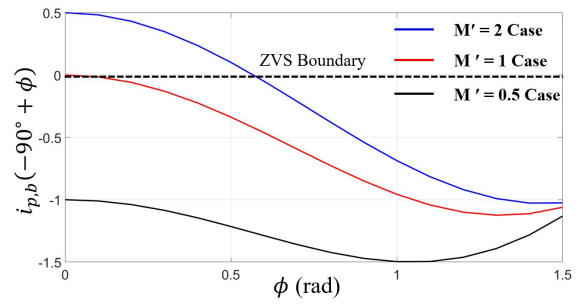


그림 4 정방향 전력 변환 시 2차측 스위치의 영전압 스위칭 조건
Fig. 4 ZVS condition of the secondary side switch for the forward power flow

그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 기존의 SPS를 사용한 경우 전압 이득이 1보다 커질 경우 경부하에서 영전압 스위칭이 되지 않는다. 하지만 EPS를 사용할 경우 경부하에서 영전압 스위칭 범위를 넓힐 수 있다. 하지만 이는 전류의 RMS를 증가시키기 때문에 영전압 스위칭에 되는 궤도를 따라 제어해야 한다. 그림 3 (c)는 1차측 스위치의 영전압 스위칭을 만족하는 동시에 RMS 전류를 최소화하는 궤도를 나타낸다. 정방향 전력 전달 시 2차측 스위치의 영전압 스위칭 조건은 그림 4와 같이 나타낼 수 있으며 이는 전압 이득의 변동에 대해 넓은 ZVS 영역을



(a)



(b)

그림 5 역방향 전력 변환 시 1차 및 2차측 스위치의 영전압 스위칭 조건: (a) 2차측 스위치의 ZVS 조건, (b) 1차측 스위치의 ZVS 조건

Fig. 5 ZVS condition of the primary and secondary side switches for backward power flow: (a) ZVS condition for secondary switch, (b) ZVS condition for primary switch

가짐을 보인다.

역방향 전력 전달 시 자화 인덕턴스가 소스와 병렬로 보이고 이를 고려하면 2차측 스위치의 영전압 스위칭 조건은 그림 5 (a)와 같이 나타낼 수 있다. 이는 EPS를 사용하지 않아도 2차측 스위치가 경부하에서 영전압 스위칭을 구현할 수 있음을 보인다. 역방향 동작 시 1차측 스위치의 영전압 스위칭 조건은 그림 5 (b)와 같이 나타낼 수 있다. 이는 전압 이득이 낮아지면 1차측 스위치가 영전압 스위칭 조건을 만족하지 못함을 보인다.

4. 결론

본 논문은 양방향 직렬 공진형 컨버터의 경부하에서 전력 변환 효율을 증가시키기 위해 전력 변환 방향에 따른 영전압 스위칭 조건을 분석하였다. 정방향 전력 변환 시에는 EPS를 사용하여 모든 스위치의 영전압 스위칭을 구현하고 역방향 전력 변환 시에는 SPS를 사용하여 모든 스위치의 영전압 스위칭을 구현할 수 있음을 보였다. 발표 시에는 영전압 스위칭의 수학적 분석 및 직렬 공진형 컨버터의 디자인 방법을 설명하고 이를 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하고자 한다.

이 논문은 2017년 동서발전 연구비(해수전지를 이용한 파일럿급 ESS 설비구축 원천기술개발 및 시험)에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] T. S. Key, "Future of renewable energy development & deployment," in Proc. IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009, pp. 1.