ZVS 동작 영역 확장을 위한 DAB 컨버터의 가변 스위칭 주파수 범위 도출

강성욱, 조철희, 정태준, 김동희†
전남대학교 전기공학과

Derivation of Variable Switching Frequency Range of DAB Converter for ZVS Operation Area Extension

Seong-Uk Kang, Cheol-Hee Jo, Tae-Jun Jeong, and Dong-Hee Kim†
Department of Electrical Engineering, Chonnam National University

ABSTRACT

본 논문은 전 구간에서 ZVS(Zero-Voltage-Switching) 동작을 하는 DAB(Dual-Active-Bridge) 컨버터를 해석한다. 기존 DAB 컨버터는 경부하 조건에서 ZVS 동작을 하지 않고 하드 스위칭을 하기 때문에 스위칭 손실이 생기는 문제를 갖는다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 DAB 컨버터의 가변 스위칭 주파수를 이용하여 경부하에서도 ZVS 동작이 되도록 설계하고 제안한 방법은 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

1. 서 론

최근 기후변화에 관심이 높아지면서 신재생에너지를 기반으로 한 에너지저장시스템 및 전기 자동차의 연구가 활발히 진행중이다. 이에 따라 에너지저장장치의 충전 및 방전에 필요한 양방향 전력변환장치에 관심이 증가하고 있다.

양방향 DC/DC 컨버터는 양방향 전력변환장치의 핵심적인 토폴로지로 안전성 향상을 위하여 절연형 토폴로지가 많이 적용되며 넓은 출력전압 범위를 달성할 수 있는 DAB 컨버터를 많이 사용한다. DAB 컨버터는 두 개의 풀 브릿지 회로와 풀 브릿지 회로 사이에 변압기로 이루어진 단순한 구조로 이루어져 있고, 풀 브릿즈 양단에서 출력되는 전압의 위상차와 방향 제어를 통해 전력을 양방향 제어를 한다.[1] DAB 컨버터는 입출력 전압 이득이 1로 일정한 경우 전 부하 구간에서 ZVS 동작을 만족하지만, DAB 컨버터의 입출력 전압 이득이 1을 제외한 승압 및 강압인 경부하 조건에서는 ZVS 동작을 만족하지 못하고 하드 스위칭을 통한 스위칭 손실로 인해 고효율 달성이 어려워진다. 이러한 문제의 단점을 보완하기 위해 기존에 제시된 DPS(Dual Phase Shift) 및 TPS(Triple Phase Shift) 등의 방법이 있지만, 제어 방식이 복잡한 단점이 있다. [2]

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 입출력 전압비가 1인 경우를 제외한 경부하 조건에서도 ZVS 동작을 만족시키는 절연형 양방향 DAB 컨버터를 제안한다. 제안하는 양방향 DAB 컨버터는 스위칭 주파수만 변동하여 경부하에서도 ZVS 동작을 만족한다. 제안된 DAB 컨버터는 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. DAB 컨버터 스위칭 주파수 가변 해석 방법

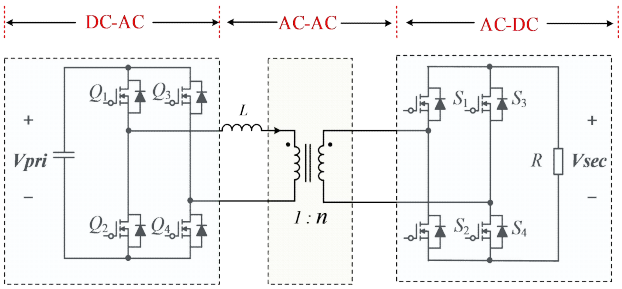

그림 1 DAB 컨버터의 회로도
Fig.1 Schematic of DAB converter

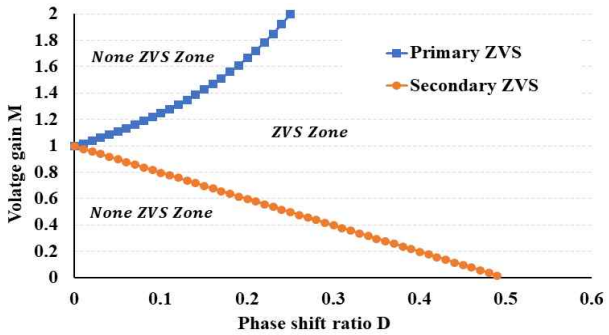

그림 2 DAB 컨버터의 ZVS 동작 범위
Fig. 2 ZVS operation range of DAB converter

제안된 양방향 DAB 컨버터는 그림 1과 같이 1, 2차 측의 풀 브리지 인버터 및 1차 측의 보조 인덕터 및 변압기로 구성된다. 먼저 DAB 컨버터의 출력 전력을 식 (1)로 표현한다. f_s는 스위칭 주파수, D는 변압기 양단의 위상 차이, D_{ZVS}는 ZVS동작을 만족하는 변압기 양단의 위상 차이를 나타낸다. 식 (1)을 통해 입출력 전압 이득 M을 나타내는 식 (2)를 나타낼 수 있다.

$$P_{OUT} = \frac{n V_{pri} V_{\sec} (1-D) D}{2 f_s L} \quad (1)$$

$$M = \frac{V_{\sec}}{V_{pri}} = \frac{n R (1-D) D}{2 f_s L} \quad (2)$$

$$1 - 2D_{ZVS} \le M \le \frac{1}{1-2D_{ZVS}} \quad (3)$$

위의 식 (2)는 ZVS 동작 영역을 제외한 영역도 포함되어 있다.

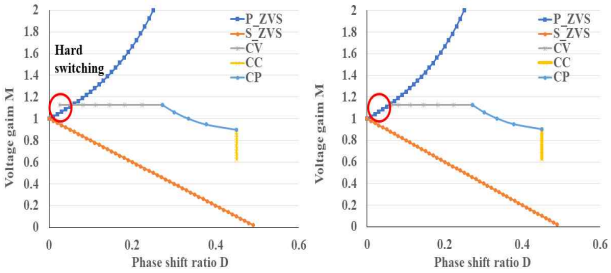

그림 3 (a) 기존 DAB 컨버터 충전모드 (b) 제안한 DAB 컨버터 충전모드

Fig. 3 (a) Conventional DAB converter charging mode
(b) Proposed DAB converter charging mode

표 1 전기적 사양

Table. 1 Electrical specification

Parameters	Value
입력전압, $V_{DC-link}$	400[V]
배터리 전압, V_{Batt}	250-450[V]
출력 전력, P_{out}	450-3600[W]

식 (3)은 입출력 전압 이득에 따라 ZVS 동작을 만족하는 변압기 양단의 위상 차이 D의 범위를 나타낸다.

$$f_s \geq \frac{n R(1-D_{ZVS})\, D_{ZVS}}{2\,ML} \tag{4}$$

기존 DAB 에 ZVS 동작을 만족하는 식 (3)을 식 (2)에 대입을 하면 식 (4)와 같이 표현될 수 있다. 위와 같은 과정을 통해 하드 스위칭 되는 DAB 컨버터 동작을 ZVS 동작을 하게 되며, 이를 시뮬레이션을 통해 검증한다.

3. 시뮬레이션 결과

제안한 ZVS 동작 영역 확장을 위한 DAB 컨버터의 가변 스위칭 주파수 범위 도출을 검증하기 위해 표 1과 같은 전기적 사양에서 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션을 통해 기존 DAB 컨버터와 제안한 DAB 컨버터의 스위칭 동작을 충전 모드 및 방전 모드를 나누어 비교한다. 그림 3은 DAB 컨버터가 $V_{DC-link}$=400V, 배터리 전압 V_{Batt}=250~450V로 동작 했을 때 기존 DAB 컨버터와 제안한 DAB 컨버터의 충전 모드의 비교를 보여주고, 그림 3(b)를 통해 제안한 DAB 컨버터의 동작 영역이 모두 ZVS 달성하는 것을 볼 수 있다. 그림 4는 기존의 DAB 컨버터 충전 모드와 방전 모드에서의 시뮬레이션 인덕터 전류 파형을 보여준다. 그림 4에서 스위치가 켜질 때 인덕터 전류가 0보다 큰 파형으로 동작하고, 이를 통해 ZVS 동작을 하지 않는 것을 알 수 있다. 컨버터의 스위칭 주파수를 가변하기 전 ZVS 동작을 만족하는 위의 식 (3)을 활용하여 전압 이득 M을 ZVS 동작 영역에 만족하는 변압기 양단의 위상 차이 D의 최솟값을 구해내고 주어진 변압기 양단의 위상 차이 범위를 이용하여 위의 식 (4)에 값을 대입하여 스위칭 주파수를 바꾸어 준다. 그림 5는 제안한 DAB 컨버터의 충전 모드와 방전 모드의 인덕터 전류를 보여준다. 스위치가 켜질 때 표시된 인덕터 전류의 크기가 0보다 작음을 확인하였고, 이를 통해 스위치의 ZVS 동작을 알 수 있다.

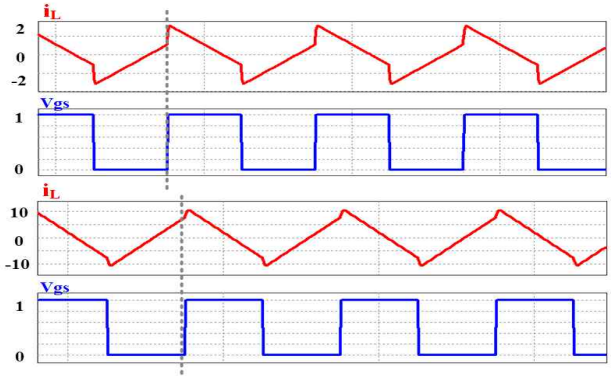

그림 4 기존 DAB의 충전, 방전 시뮬레이션 파형

Fig. 4 Charging and discharging simulation waveform of conventional DAB

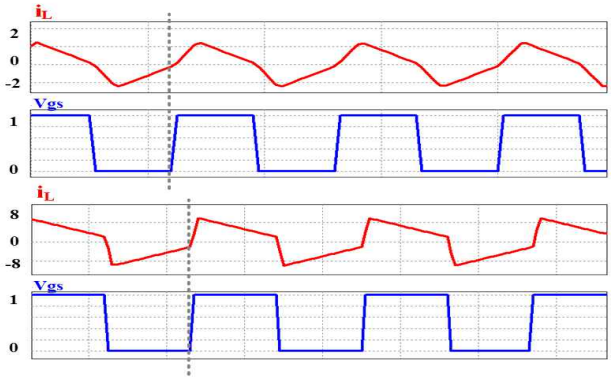

그림 5 제안한 DAB의 충전, 방전 시뮬레이션 파형

Fig. 5 Charging and discharging simulation waveform of the proposed DAB

4. 결론

본 논문은 ZVS 동작 영역 확장을 위한 DAB 컨버터의 스위칭 주파수의 가변 범위 도출을 해석했다. 제안한 DAB 컨버터는 기존 경부하일 시 ZVS 동작이 되지 않고 스위칭 손실이 발생하여 전력손실이 생기는데 이를 스위칭 주파수 가변을 통해 전부하에서 ZVS 동작시킨다. 시뮬레이션 결과, 해석된 DAB 컨버터는 ZVS 동작 영역 밖에서도 ZVS 동작하는 것을 확인하였다. 향후 실험을 통해 설계의 타당성을 검증하고, 최적 효율 달성 방안을 연구할 예정이다.

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 '차세대 AC/DC Hybrid 배전 네트워크 기술개발사업'으로 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2023-00281219)

참 고 문 헌

[1] J. Hiltunen, V. Väisänen, R. Juntunen and P. Silventoinen, "Variable-Frequency Phase Shift Modulation of a Dual Active Bridge Converter," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 12, pp. 7138-7148, Dec. 2015

[2] 곽봉우, 김종훈. (2022). Cascode GaN FET 기반 EV용 V2x DAB 컨버터의 경부하 효율 분석. 전기학회논문지, 71(11), 1631-1638, 10.5370/KIEE.2022.71.11.1631