영전압 스위칭 특성 개선을 위한 DAB 컨버터의 오프셋 전류 변조 기법

최동민, 이민수, 방지훈, 정영훈, 문건우
한국과학기술원

Offset Current Modulation Technique for ZVS Characteristic Improvement in DAB Converter

Dongmin Choi, Minsu Lee, Jihun Bang, Yeonghun Jeong, Gun-Woo Moon
KAIST

ABSTRACT

본 논문에서는 영전압 스위칭 특성 개선을 위한 듀얼 액티브 브리지 (DAB) 컨버터의 오프셋 전류 변조 기법을 제안한다. 기존 DAB 컨버터에서는 트랜스포머의 포화를 방지하기 위해 트랜스포머 1차 측과 2차 측의 평균 전류가 0에 가까워지도록 제어한다. 반면, 제안하는 변조 기법은 1차 측과 2차 측에 동일한 크기의 오프셋 전류를 주입해줌으로써 추가적으로 스위치 2개의 영전압 스위칭을 달성하여 고효율을 달성할 수 있다. 제안하는 제어 기법의 효용성은 400 V 입력과 280 – 420 V 출력을 갖는 3.3kW 프로토타입을 통하여 검증되었다.

1. 서 론

최근 전기자동차 판매 및 보급이 급증함에 따라 에너지 저장 장치 (ESS)로서의 전기차의 역할이 주목받고 있다. Vehicle-to-grid (V2G), Vehicle-to-Leisure(V2L) 등 전기자동차에 저장된 에너지를 그리드 혹은 외부 전기 장치로 전력을 공급하는 기술이 최근에 개발되고 있으며, 이에 따라 전기자동차를 하나의 컨버터로 충전 및 방전이 가능토록 하는 양방향 컨버터에 대한 관심이 증가하고 있다.

듀얼 액티브 브리지 (DAB) 컨버터는 전기 자동차, DC 마이크로 그리드 또는 배터리 관리 시스템과 같은 양방향 전력 전송이 필요한 다양한 산업 응용 분야에서 주로 사용되는 컨버터 토폴로지이다[1]-[2]. DAB 컨버터는 그림 1과 같이 2개의 풀-브리지, 트랜스포머와 추가 인덕터로 구성되며, 소프트 스위칭이 가능하여 높은 효율을 달성할 수 있다. 기존에는 그림 2와 같이 간단하게 두 개의 풀-브리지의 위상 차이만을 조절하는 single phase shift(SPS) 변조를 사용하여 출력 전압을 제어하였다. 하지만 SPS 변조는 전압 이득이 1에서 멀어지면 ZVS 특성이 악화되므로, 높은 스위칭 손실이 발생하여 효율이 떨어질 뿐만 아니라 잠재적으로 EMI 문제가 발생할 수 있다.

이에 따라 최근에는 DAB 컨버터가 가진 다수의 제어 변수를 추가로 활용하여 높은 효율을 달성하는 연구가 진행되고 있다[3]-[6]. 많은 연구들이 풀-브리지 내부의 시비율을 추가적인 제어 변수들로 활용함으로써 높은 효율을 달성하였으며, 최근에는 매우 높은 효율을 달성하기 위해 최대 5개의 제어 변수를 활용하는 연구들이 제안되었다. 시비율 조절 이외에도 가변 인덕터를 사용하거나 캐패시터의 전압을 조절함으로써 새로운 제어 변수를 만들어내는 연구도 진행되었다.

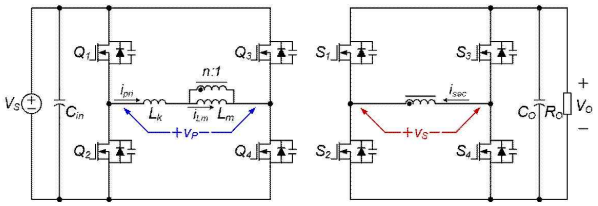


그림 1. 듀얼 액티브 브리지 (DAB) 컨버터

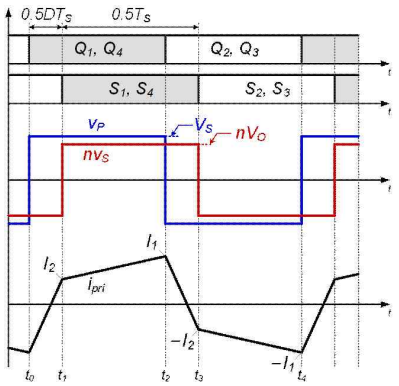


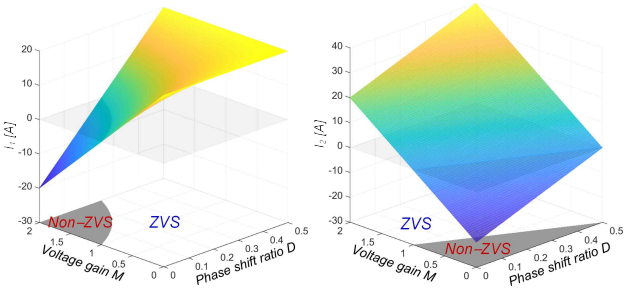
그림 2. Single phase shift (SPS) 변조

본 논문에서는 영전압 스위칭 특성 개선을 위한 DAB 컨버터의 오프셋 전류 변조 기법을 제안한다. 기존 DAB 컨버터에서는 트랜스포머의 포화를 방지하기 위해 트랜스포머의 1차 측과 2차측의 평균 전류가 0에 가까워지도록 제어한다. 반대로, 제안하는 변조 기법은 1차 측과 2차 측에 동일한 크기의 오프셋 전류를 주입해줌으로써 새로운 제어 변수를 얻을 수 있다. 이때 새로운 제어 변수를 적절하게 제어해줌으로써 추가적으로 스위치 2개의 영전압 스위칭을 달성할 수 있다. 이에 따라 제안하는 제어 기법을 활용하여 고효율을 달성할 수 있다.

2. 제안하는 제어 기법

1.1 기존 SPS 변조의 ZVS 특성

그림 2에서 D는 1차 측과 2차 측 사이의 위상 차이, T_S과 V_S는 각각 스위칭 주기와 입력 전압, L_k는 리키지 인덕터, 그리고 M은 전압 이득을 나타낸다. 그림 2와 같이 1차측 및 2차측 스위치가 스위칭 할 때의 리키지 인덕터 전류를 각각 I_1과 I_2로 정의하며, 아래 수식과 같이 나타낼 수 있다.



(a) (b)

그림 3. DAB 컨버터의 ZVS 특성. (a) 1차측 스위치의 ZVS 특성. (b) 2차측 스위치의 ZVS 특성.

$$I_1 = \frac{T_S V_S}{4L_k}(2MD+1-M) \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{T_S V_S}{4L_k}(2D-1+M) \quad (2)$$

스위치의 ZVS를 달성하기 위해서는 스위치가 턴-오프된 후 스위치의 바디 다이오드에 전류가 흘러야 한다. 따라서 1차측과 2차측의 ZVS를 달성하기 위해서는 아래 수식을 만족하여야 한다.

$$D > \frac{M-1}{2M} \quad (3)$$

$$D > \frac{1-M}{2} \quad (4)$$

(1)-(4)를 그림으로 나타내면 그림 3과 같다. 그림에서 확인할 수 있듯이, DAB 컨버터의 전압 이득이 1일 때에는 모든 동작 범위에서 모든 스위치의 ZVS를 달성할 수 있다. 그러나, 전압 이득이 1에서 멀어질수록 ZVS 달성 범위가 좁아짐을 확인할 수 있다.

1.2 제안하는 제어 기법

1차 측과 2차 측 평균 전류를 각각 $\bar{i}_{pri}$, $\bar{i}_{\sec}$, 그리고 트랜스포머 자화 인덕터의 DC bias를 $\bar{i}_{Lm}$이라고 정의할 때, $\bar{i}_{Lm}$은 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\bar{i}_{Lm} = \bar{i}_{pri} - \bar{i}_{\sec}/n \quad (5)$$

DAB 컨버터는 게이트 구동 신호, 기생 저항 등 다양한 이유로 인해 자화 인덕터에 voltage-second 불균형이 발생하며, 이로 인해 자화 인덕터에 DC bias가 발생한다. 이러한 트랜스포머의 DC bias는 전력 밀도와 효율을 악화시키므로, 기존 제어 기법에서는 $\bar{i}_{pri}$와 $\bar{i}_{\sec}$을 모두 0에 가까워지도록 제어해줌으로써 자화 인덕터의 DC bias를 제거한다.

제안하는 제어 기법에서는 그림 4와 같이 1차 측과 2차 측 평균 전류를 I_M과 nI_M으로 수렴시킨다. 제어 기법을 사용하여도 자화 인덕터에 DC bias가 발생하지 않으며, 이는 (6)을 통해 확인할 수 있다. 따라서 제안하는 제어 기법은 오프셋 전류를 새로운 제어 변수로 활용한다.

$$\begin{aligned}\bar{i}_{Lm} &= \bar{i}_{pri} - \bar{i}_{\sec}/n \\ &= I_M - nI_M/n \\ &= 0\end{aligned} \quad (6)$$

그림 4는 ZVS 특성을 개선하기 위해 오프셋 전류를 활용하는 방법에 대해 나타낸다. 기존 제어 기법을 활용하였을 때 1차 측 스위치의 ZVS를 달성하지 못하는 경우, 제안하는

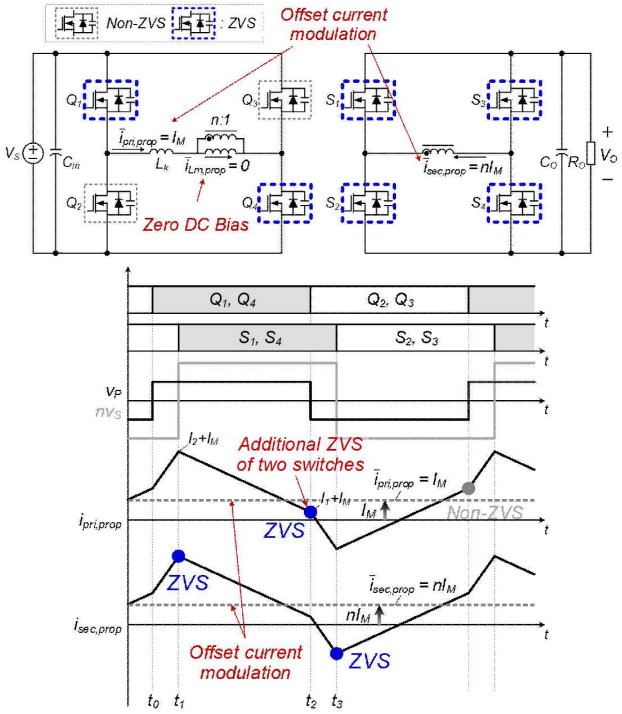


그림 4. 제안하는 제어 기법

표 1 프로토타입 컨버터 설계 요약

	기존 제어 기법	제안하는 제어 기법
1차측 & 2차측 스위치	SCT3060 650 V, 250 mΩ	
변압기	PQ40/40 1.1 mH, 32:28	
직렬 인덕터	PQ32/30 L_k = 50 μH	

제어 기법을 활용하여 1차 측과 2차 측에 적절하게 오프셋을 주입해줌으로써 추가적으로 2개 스위치의 ZVS를 달성할 수 있다.

3. 실험 결과

제안된 기법의 타당성을 확인하기 위해 400 V 입력, 280 - 420 V/7.85 A 출력 및 100 kHz의 스위칭 주파수 조건에서 프로토타입 컨버터를 제작하고 실험을 통해 검증하였다. 프로토타입 컨버터의 설계 요약은 표 1과 같다. 입력 소스와 출력 부하는 각각 Sorensen SGA 400/12와 Prodigit 3255를 사용하였으며, 효율은 Yokogawa WT1802E로 측정하였다.

그림 5와 그림 6은 각각 280 V 입력과 40% 로드 조건에서의 기존 제어 기법과 제안하는 제어 기법을 사용했을 때의 실험 결과를 나타낸다. 그림 5와 같이, 기존 제어 기법을 사용했을 때에는 1차 측과 2차 측 평균 전류가 모두 0으로 나타나는 것을 확인하였으며, 1차 측 스위치는 ZVS를 달성할 수 있는 반면 2차측 스위치는 하드 스위칭 하는 것을 확인하였다. 그림 6과 같이, 제안하는 제어 기법을 사용했을 때에는 1차측과 2차측 평균 전류가 각각 1.5 A, 1.7 A로 수렴하도록 제어하였다. 1차측 스위치는 기존 제어 기법과 동일하게 모두 ZVS를 달성할 수 있었으며, 제안하는 제어 기법을 활용하여 2차측 스위치 2개의 ZVS를 추가로 달성할 수 있었다.

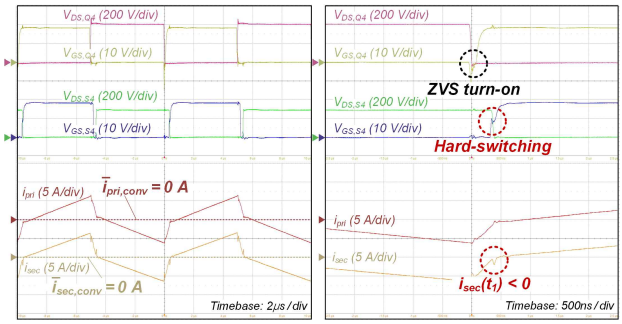


그림 5. 기존 제어 기법을 사용하였을 때의 실험 파형

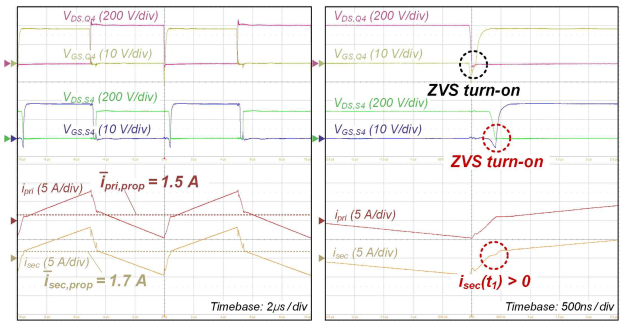


그림 6. 제안하는 제어 기법을 사용했을 때의 실험 파형

4. 결론

본 논문에서는 영전압 스위칭 특성 개선을 위한 DAB 컨버터의 오프셋 전류 변조 기법을 제안한다. 기존 DAB 컨버터에서는 트랜스포머의 포화를 방지하기 위해 트랜스포머의 1차측과 2차측의 평균 전류가 0에 가까워지도록 제어한다. 반대로, 제안하는 변조 기법은 1차 측과 2차 측에 동일한 크기의 오프셋 전류를 주입해줌으로써 새로운 제어 변수를 얻을 수 있다. 이때 새로운 제어 변수를 적절하게 제어해줌으로써 추가적으로 스위치 2개의 영전압 스위칭을 달성할 수 있다. 이에 따라 제안하는 제어 기법을 활용하여 고효율을 달성할 수 있다.

이 성과는 2023년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2021R1A5A1031868)

참 고 문 헌

[1] F. Krismer and J. W. Kolar, "Efficiency-optimized high-current dual active bridge converter for automotive applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 7, pp. 2745-2760, Jul. 2012.

[2] M. Lee, D. Choi, J. Chae, S. Cheon and G.-W. Moon, "Voltage-balancing dual-active-bridge (VB-DAB) converter for bipolar DC distribution system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 70, no. 3, pp. 2461-2471, Mar. 2023.

[3] B. Zhao, Q. Yu and W. Sun, "Extended-phase-shift control of isolated bidirectional DC-DC converter for power distribution in microgrid," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 11, pp. 4667 - 4680, Nov. 2012.

[4] H. Bai and C. Mi, "Eliminate reactive power and increase system efficiency of isolated bidirectional dual-active-bridge DC - DC converters using novel dual-phase-shift control," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 6, pp. 2905 - 2914, Nov. 2008.

[5] W. Choi, K. M. Rho, and B. H. Cho, "Fundamental duty modulation of dual-active-bridge converter for wide-range operation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 6, pp. 4048 - 4064, Jun. 2016.

[6] S. Saeed, J. Garcia and R. Georgious, "Dual-active-bridge isolated DC - DC converter with variable inductor for wide load range operation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 7, pp. 8028-8043, July 2021.