

# 직렬-입력 구조를 갖는 DAB 컨버터의 새로운 전압 분배 제어 기법

최동민, 김재상, 정영훈, 김성준, 문건우  
한국과학기술원

## A New Voltage Distribution Strategy in Input-Series Connected Dual Active Bridge Converters

Dongmin Choi, Jae-Sang Kim, Yeonghun Jeong, Seongjun Kim, Gun-Woo Moon  
KAIST

### ABSTRACT

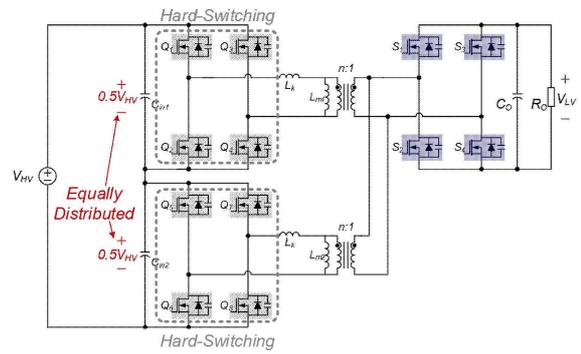
본 논문에서는 직렬-입력 구조를 갖는 듀얼 액티브 브리지 (DAB) 컨버터의 새로운 전압 분배 제어 기법을 제안한다. 기존 전압 분배 제어는 안정적인 동작과 균일한 파워 분배를 위해 입력 전압을 동일하게 분배한다. 그러나 전압 이득이 1에서 멀어지면, 입력 측에 위치한 모든 스위치에서 동시에 하드 스위칭이 발생하여 효율이 낮아진다는 단점을 갖는다. 제안하는 제어 기법에서는 비대칭하게 입력 전압을 분배함으로써 입력 측에 위치한 스위치 중 절반은 영전압 스위칭을 항상 달성할 수 있다. 제안하는 제어 기법의 효율성은 450 - 850 V 입력과 400 V 출력을 갖는 6.6 kW 프로토타입을 통하여 검증되었다.

### 1. 서론

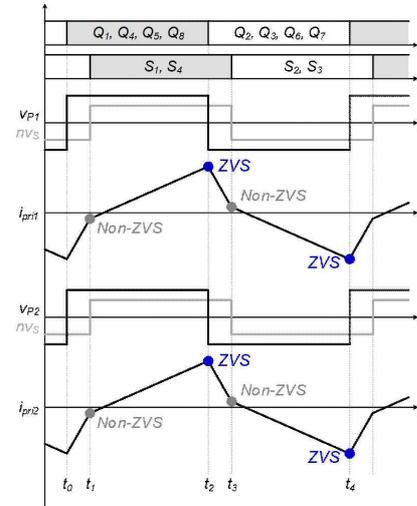
최근 전기 자동차 시장에서는 전기 자동차의 충전 용량 및 충전 효율을 향상시키기 위해 기존의 400 V 배터리 시스템 대신 고전압 배터리를 활용하여 800 V 시스템을 적용하는 경우가 늘어나고 있다. 따라서 전기 자동차 내의 고전압 배터리와 연결된 컨버터인 OBC나 LDC는 800 V 이상의 전압을 견딜 수 있어야 한다. 이때, 기존 400 V 시스템에서 사용하던 컨버터 모듈을 입력-직렬 구조로 구성하여 800 V 시스템에 대응할 수 있으므로, 입력-직렬 구조가 고전압 배터리 시스템에 대응하기 위한 여러 방향 중 하나로 연구가 진행되고 있다<sup>[1]</sup>.

듀얼 액티브 브리지 (DAB) 컨버터는 양방향 전력전송이 가능하며, 간단한 구조와 함께 변압기를 통해 절연을 제공할 수 있어 양방향 OBC에 널리 적용되고 있다. 일반적으로 DAB 컨버터는 1차 측과 2차 측 풀-브리지의 위상 차이를 조절하는 single phase shift (SPS) 변조를 사용하여 출력을 제어한다. 이러한 SPS 제어는 전압 이득이 1에 가까울 때 영전압 스위칭을 달성할 수 있으므로 높은 효율을 달성할 수 있다. 그러나 전압 이득이 1에서 멀어짐에 따라 DAB 컨버터의 영전압 스위칭을 달성할 수 없으므로, 스위칭 손실로 인해 효율이 낮아지며 EMI 문제가 발생할 수 있다<sup>[2]</sup>.

특히 직렬-입력 구조를 갖는 DAB 컨버터는 모든 모듈에서 동시에 이러한 문제가 발생하므로, 직렬-입력 구조를 갖는 DAB 컨버터의 영전압 스위칭 범위를 확장하기 위한 연구들이 진행되었다<sup>[3-14]</sup>. 기존 연구에서는 릴레이를 추가하거나, 모듈 사이에 LC 회로를 추가하여 영전압 스위칭 범위를 확장하였다. 그러나 기존 연구들은 여러 소자가 추가되므로 전력 밀도가 약화된다.



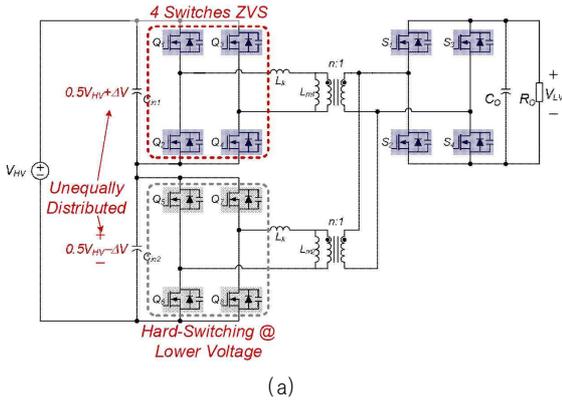
(a)



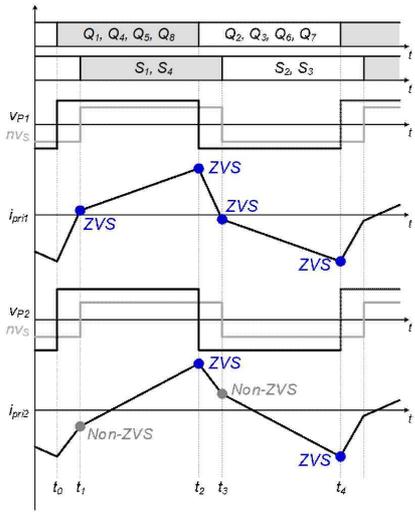
(b)

그림 1. 기존의 입력 전압 분배 제어 기법. (a) 회로 구조 (b) 동작 파형

따라서 본 논문에서는 직렬-입력 구조를 갖는 DAB 컨버터의 새로운 전압 분배 제어 기법을 제안한다. 기존 제어 기법은 입력 측에 위치한 두 풀-브리지에 동일하게 입력 전압을 분배한다. 반면, 제안하는 제어 기법은 입력 전압을 비대칭적으로 분배한다. 이때, 비대칭적으로 분배하는 전압을 적절하게 조절함으로써 1차측 스위치 중 절반이 항상 영전압 스위칭을 달성할 수 있다. 추가적으로, 영전압 스위칭을 달성하지 못하는 나머지 1차측 스위치도 더 낮은 전압에서 하드 스위칭 동작이 일어난다. 결론적으로, 제안하는 제어 기법은 스위칭 손실을 큰



(a)



(b)

그림 2. 제안하는 입력 전압 분배 제어 기법. (a) 회로 구조 (b) 동작 파형

폭으로 줄임으로써 고효율을 달성할 수 있다.

## 2. 제안하는 제어 기법

### 2.1 기존 제어 기법

그림 1은 기존의 입력 전압 분배 제어 기법을 나타낸다. 입력-직렬 구조를 갖는 DAB 컨버터의 입력 측은 2개의 풀-브리지로 구성되어 있다고 가정한다. 그림 1(a)와 같이, 기존 제어 기법은 모듈 간 전력 분배 및 1차측 스위치의 전압 스트레스를 고려하여 입력 전압을 동일하게 분배한다. 따라서 두 모듈은 동일한 입력, 출력 전압을 가지며 동일한 출력 전력을 갖기 때문에 동일한 전압 및 전류 파형을 가진다.

그러나 기존 제어 기법은 큰 스위칭 손실이 발생한다는 한계를 가진다. 전압 이득이 1보다 클 때, 입력 측의 두 풀-브리지는 완전히 동일한 전류 파형을 가지기 때문에 그림 1(b)와 같이 1차 측 스위치 8개에서 모두 하드 스위칭이 발생한다. 이는 큰 스위칭 손실을 발생시킨다.

### 2.2 제안하는 제어 기법

그림 2는 제안하는 입력 전압 분배 제어 기법을 나타낸다. 그림 2(a)와 같이, 위쪽 풀-브리지에 인가되는 전압을  $\Delta V$  만큼 크게, 아래쪽 풀-브리지에 인가되는 전압은  $\Delta V$  만큼 작게 제어한다. 이때, 위쪽 모듈의 전압 이득이 1에 가까워지므로 1차

표 1 프로토타입 컨버터 설계 요약

	기존 제어 기법	제안하는 제어 기법
1차측 & 2차측 스위치	SCT3060 650 V, 60 mΩ	SCT3060 650 V, 60 mΩ
변압기	PQ40/40 1 mH, 26:32	PQ40/40 1 mH, 26:32
직렬 인덕터	PQ32/30 $L_k = 50 \mu\text{H}$	PQ32/30 $L_k = 50 \mu\text{H}$

측 스위치 4개의 영전압 스위칭을 달성할 수 있다. 추가적으로, 아래쪽 모듈의 1차측 스위치는  $\Delta V$ 만큼 작은 전압에서 하드 스위칭한다. 결과적으로, 두 모듈 모두 1차측 스위치에서 발생하는 스위칭 손실을 저감할 수 있으므로 높은 효율을 달성할 수 있다.

### 1.3 $\Delta V$ 계산

DAB 컨버터의 1차측 스위칭 전류  $I_1$ 은 아래와 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

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

1차측 스위치의 영전압 스위칭을 달성하기 위해서는  $I_1$ 이 0보다 커야 한다. 따라서 (1)을 통해 1차측 스위치의 영전압 스위칭 범위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

제안하는 제어 기법은 기존 하드 스위칭하는 동작 범위에서 위쪽 풀-브리지의 스위칭 전류  $I_1$ 이 0이 될 수 있도록 입력 전압을 조절한다. 따라서 제안하는 제어 기법을 적용하였을 때 위쪽 모듈의 입력 전압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{in1} = \begin{cases} nV_O(1-2D) & D \leq \frac{M-1}{2M} \\ 0.5V_{HV} & D > \frac{M-1}{2M} \end{cases} \quad (3)$$

따라서  $\Delta V$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta V = \begin{cases} nV_O(1-2D) - 0.5V_{HV} & D \leq \frac{M-1}{2M} \\ 0 & D > \frac{M-1}{2M} \end{cases} \quad (4)$$

## 3. 실험 결과

제안하는 제어 기법의 효율성을 검증하기 위하여 450-850 V/7.76 A 입력 및 100 kHz의 스위칭 주파수 조건 하에서 6.6 kW 프로토타입을 제작하였다. 프로토타입 컨버터의 설계 요약은 표 1과 같다.

그림 3과 그림 4는 550 V 입력 및 30% 로드 조건에서의 기존 제어 기법과 제안하는 제어 기법을 적용했을 때의 실험 파형이다. 그림 3과 같이, 기존 제어 기법은 두 풀-브리지에 인가되는 전압을 275 V로 동일하게 분배하며, 동일한 전류 파형을 가진다. 다만, 전압 이득이 1에서 멀 때에는 1차 측 스위치가 모두 하드 스위칭 함을 확인하였다. 그림 4와 같이, 제안하는 제어 기법을 적용하면 위쪽과 아래쪽 풀-브리지에 294.8 V, 255 V의 전압을 인가한다. 이 때, 아래쪽 모듈의 전압 이득이 1에 가까워지므로 모듈 2의 1차측 스위치의 영전압 스위칭을 달성할 수 있음을 확인하였다.

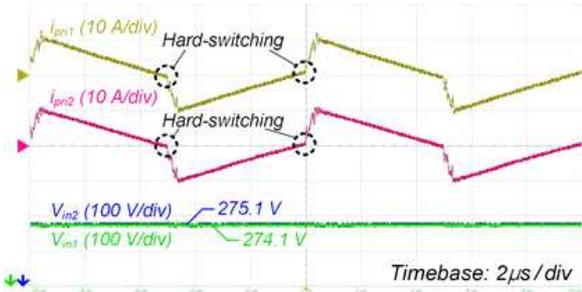


그림 3. 기존 제어 기법의 실험 파형. ( $V_{HV} = 550$  V, 30% 출력 조건)

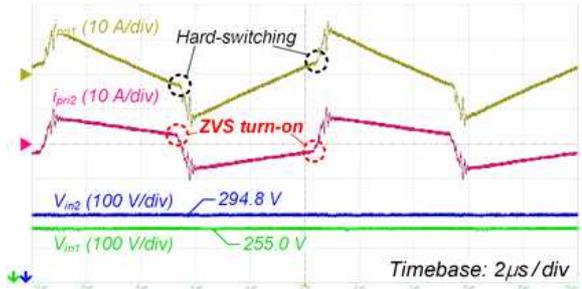


그림 4. 제안하는 제어 기법의 실험 파형. ( $V_{HV} = 550$  V, 30% 출력 조건)

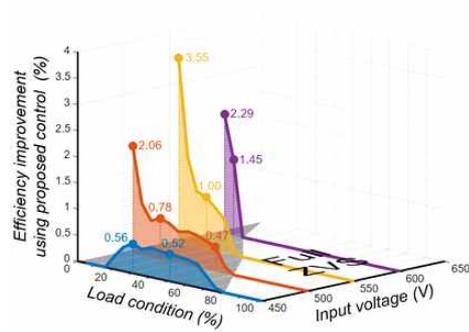


그림 5. 제안하는 제어 기법을 적용하였을 때 증가 효율.

그림 5는 제안하는 제어 기법을 적용하였을 때 증가하는 효율을 나타낸다. 제안하는 제어 기법은 최대 3.55%의 효율을 증가시킬 수 있으며, 기존 하드 스위칭 영역 대부분에서 효과가 있음을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 직렬-입력 구조를 갖는 DAB 컨버터의 새로운 전압 분배 제어 기법을 제안한다. 제안하는 제어 기법에서는 비대칭하게 입력 전압을 분배함으로써 입력 측에 위치한 스위치 중 절반은 영전압 스위칭을 항상 달성할 수 있다. 제안하는 제어 기법의 효율성은 450 - 850 V 입력과 400 V 출력을 갖는 6.6 kW 프로토타입을 통하여 검증되었다.

이 성과는 2024년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2021R1A5A1031868)

#### 참 고 문 헌

- [1] H. Wouters and W. Martinez, "Bidirectional onboard chargers for electric vehicles: state-of-the-art and future trends," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 39, no. 1, pp. 693-716, Jan. 2024.
- [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] E. Serban, C. Pondiche and M. Ordonez, "Analysis and design of bidirectional parallel-series DAB-based converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 38, no. 8,