

# Split-Capacitor Dual-Active-Bridge 컨버터

김기수, 박시호, 차현녕, 김흥근  
경북대학교

## Split-Capacitor Dual-Active-Bridge Converter

Kisu Kim, Siho Park, Honnyong Cha, Heung Geun Kim  
Kyungpook National University

### ABSTRACT

본 논문은 넓은 영전압 스위칭 범위와 고효율을 가지는 Split Capacitor Dual Active Bridge 컨버터를 제안한다. 제안한 컨버터는 기존의 Dual Active Bridge의 풀 브릿지 구조를 Split Capacitor 구조로 변경하여 회로를 개선하였다. 비록 제안한 컨버터는 변압기 전류가 기존의 회로보다 2배만큼 높아지지만 6개 스위치의 정격 전압이 절반으로 줄어들며, 넓은 영전압 스위칭 범위를 가진다. 또한 변압기 전류의 증가로 인해, 기존의 컨버터에 비해 1/4만큼 작은 누설 인덕턴스로 같은 전력을 넘길 수 있다. 추가된 커패시터는 변압기 DC 성분에 의한 포화 문제를 막아주며 두 개의 출력을 가질 수 있도록 한다. 제안한 컨버터의 성능을 검증하기 위해 3 kW의 시제품을 제작하여 실험을 통해 증명하였다.

### 1. 서론

최근 전기적 절연기능을 가진 양방향 컨버터는 전기 자동차 산업, 마이크로 그리드에 대한 에너지 저장 시스템 및 항공 우주의 전력 시스템과 같은 전력 전자 분야에서 수요가 점점 늘고 있다<sup>[1-3]</sup>. 그렇기에 고주파수 절연, 승압 및 강압 특성, 고효율 및 양방향 기능을 가지는 그림 1의 Dual Active Bridge (DAB) 회로가 여러 분야에서 각광받고 있다<sup>[3]</sup>.

그러나 기존의 DAB 컨버터의 스위치 전압 스트레스와 변압기 전압은 입력 전압( $V_{in}$ )과 동일하다. 이 때문에 기존의 DAB 컨버터는 영전압 스위칭(ZVS)을 위해 많은 에너지가 요구된다. 만약 제안한 컨버터가 노이즈나 외부적인 요인으로 게이트 신호의 불평형을 이룬다면 변압기 DC성분으로 인한 포화 문제를 갖는다. 이를 막기 위해 블록 커패시터가 양단에 필요하다.

하프 브리지 구조의 DAB 컨버터는 제어와 구조가 단순하고 변압기 포화 문제가 없기에 산업에서 널리 사용된다<sup>[4,5]</sup>. 그러나 이의 스위치는 높은 전압 및 전류 스트레스를 가지고 있으며 3 level 전압을 가지지 못하기 때문에 제어방식에 제약이 있다<sup>[6]</sup>.

본 논문에서는 Split Capacitor(SC) 구조를 가진 DAB 컨버터를 제안한다. 제안한 컨버터는 변압기 전압과 6개 스위치의 전압은 입력 전압의 절반과 같다. 또한 이는 추가적인 소자 없이 게이트 신호의 불평형에 의한 변압기 포화 문제를 막을 수 있다. 3 kW 시제품의 실험을 통해 제안한 컨버터를 검증하였다.

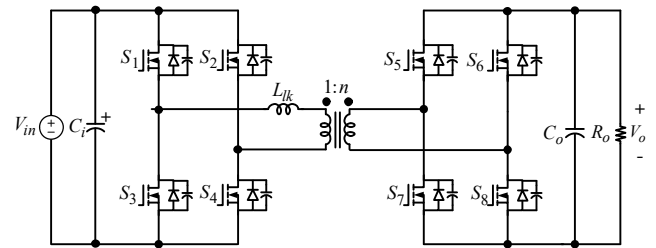


그림 1. 기존의 Dual-Active-Bridge 컨버터  
Fig. 1. Conventional Dual-Active-Bridge Converter

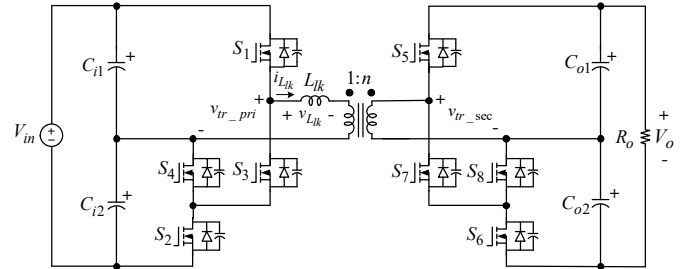


그림 2. 제안한 컨버터  
Fig. 2. Proposed Converter

### 2. 본문

#### 2.1 회로구성

그림 2는 본 논문에서 제안하는 Split Capacitor Dual Active Bridge 컨버터 회로를 나타낸다. 이는 기존의 풀 브릿지 구조에 2개의 커패시터가 추가된 Split Capacitor 구조가 변압기 양단에 구성된 형태다. 스위치 1, 2는 각각 스위치 3, 4와 상호보완적이며 스위치 1과 2는 180도의 위상차를 가진다. 스위치 출력 커패시터의 이상적인 충전과 방전을 위해서는 스위치 1, 3, 5, 7의 듀티비는 0.5보다 작아야 한다. 하지만 본 논문에서는 스위치 출력 커패시터의 충전 및 방전을 무시하고 모든 스위치의 듀티비를 0.5로 설정한 상태로 분석을 진행하였다. 제안한 회로는 기존의 DAB와 같이 양 단의 위상차( $\theta$ )를 통해 회로가 제어된다.

#### 2.2 동작모드

제안한 컨버터의 주요 동작 파형은 그림 3에 나타내었다. 모든 소자가 이상적으로 동작하며 Dead Time이 생략된 상태로

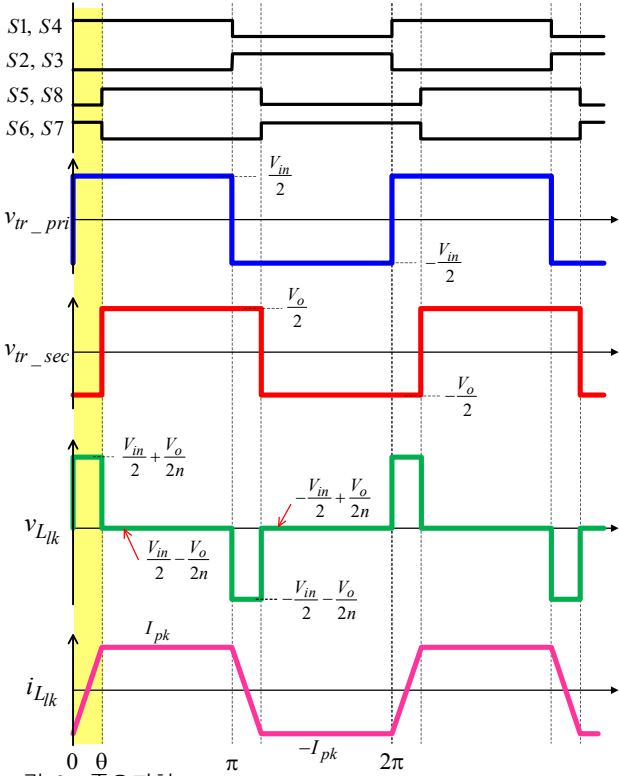


그림 3. 주요파형  
Fig. 3. Key Waveforms

분석된 파형이다.

1) 모드 1 [0 θ]

모드 1에서는 스위치 1, 4, 6, 7이 켜진다. 인덕터의 에너지는 전류가 음일 때는 입력과 출력으로 방전하며 전류가 양일 때는 입력과 출력으로부터 충전된다.

$$v_{Llk} = \frac{V_{in}}{2} + \frac{V_o}{2n} \quad (1)$$

2) 모드 2 [θ π]

모드 2에서는 이전상태에서 스위치 6, 7이 꺼지고 5, 8이 켜지며 입력에서 출력 커패시터 1으로 전력이 넘어간다.

$$v_{Llk} = \frac{V_{in}}{2} - \frac{V_o}{2n} \quad (2)$$

3) 모드 3 [π (π+θ)]

이 모드는 모드 1과 반대로 스위치 2, 3, 5, 8이 켜진다. 인덕터의 전류가 양일때 인덕터의 에너지가 입력과 출력으로 방전하며, 인덕터의 전류가 음일 때 입력과 출력으로부터 인덕터의 에너지가 충전된다.

$$v_{Llk} = -\frac{V_{in}}{2} - \frac{V_o}{2n} \quad (3)$$

4) 모드 4 [(π+θ) 2π]

모드 4는 이전상태의 스위치 5, 8이 꺼지고 6, 7이 켜진다. 이 모드에선 입력에서 출력 커패시터 2로 전력이 넘어간다.

표 1 기존 DAB 컨버터와 제안한 컨버터 비교

Table 1 Comparison between Conventional and SC DAB Converter

	기존 DAB 컨버터	제안한 컨버터
$P_o$	$\frac{V_{in}V_o\theta(1-\theta/\pi)}{2\pi fnL_{lk}}$	$\frac{V_{in}V_o\theta(1-\theta/\pi)}{8\pi fnL_{lk}}$
$I_{pk}$	$\frac{(nV_{in}-V_o)\theta}{2\pi fnL_{lk}}$	$\frac{(nV_{in}-V_o)\theta}{4\pi fnL_{lk}}$
$V_{TF}$	$V_{in}$	$0.5V_{in}$
$V_{sw}$	pri: $V_{in}$ , sec: $V_o$	$V_{in}(1), 0.5V_{in}(2,3,4)$ $V_o(5), 0.5V_o(6,7,8)$
$I_{sw}$	pri: $I_{pk}$ , sec: $I_{pk}/n$	pri: $I_{pk}$ , sec: $I_{pk}/n$
ZVS	O	O (extended)
Transformer Saturation	O	X
$\frac{1}{2}CV^2 _{total}$	$2CV_{in}^2$	$\frac{7}{8}CV_{in}^2$

$$v_{Llk} = -\frac{V_{in}}{2} + \frac{V_o}{2n} \quad (4)$$

1.3 기존의 컨버터와 제안한 컨버터의 분석 및 비교

모드 1, 3에서의 인덕터 전압이 모드 2, 4에서의 인덕터 전압보다 현저히 클 시, 모드 1과 3에서 충전 및 방전되는 에너지 차이가 같다고 가정할 수 있다. 이 경우의 변압기 최대 전류는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_{pk} = \frac{(nV_{in}-V_o)\theta}{4\pi fnL_{lk}} \quad (5)$$

또한 모드 2, 4에서 넘어가는 전력의 합이 출력 전력이기여 출력 전력은 다음과 같이 도출된다.

$$P_o = \frac{V_{in}V_o\theta(1-\theta/\pi)}{8\pi fnL_{lk}} \quad (6)$$

위의 식을 토대로 제안한 컨버터와 기존의 DAB 컨버터를 비교할 수 있다 (표 1). 기존의 DAB와 제안한 컨버터가 똑 같은 전력과 θ를 가진다고 가정한다. 이 경우 제안한 컨버터의 누설 인덕턴스 값이 기존의 DAB의 1/4만큼 줄어든다. 비록 제안한 컨버터는 변압기의 전류가 기존보다 2배만큼 커지지만, 변압기와 스위치 전압(6개)의 정격 전압은 기존의 절반이다. 이는 스위치 출력 커패시턴스에 저장되는 에너지를 줄이기 때문에 제안한 컨버터는 ZVS를 위해 필요한 에너지가 기존의 DAB 컨버터보다 적다. 그렇기에 제안한 컨버터는 기존보다 더 넓은 ZVS 범위가지고 있어 더 넓은 전압구간에서 ZVS를 이룰 수 있다. 또한 추가된 커패시터의 Charge Balance 조건에 의해 제안한 컨버터는 게이트 신호가 불평형을 이루더라도 변압기의 포화문제가 일어나지 않는 장점이 있다.

표 2 제안한 컨버터의 전기적 사양

Table 2 Electrical Specifications of the Proposed Converter

Vin	400 V	Vo	400 V
Po	3 kW	Llk	26 $\mu$ H
Ci	50 $\mu$ F	Co	50 $\mu$ F
Switch (600V)	IXFH80N60	Switch (300V)	IXFH72N30

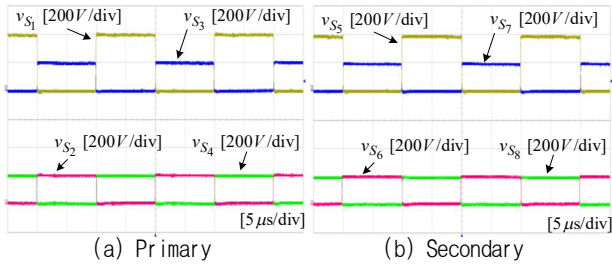


그림 4. 스위치 전압

Fig. 4. Switch Voltage of the Proposed Converter.

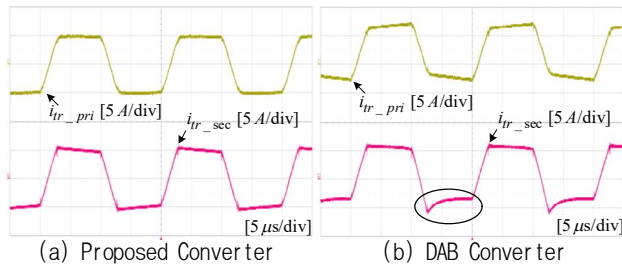


그림 5. 인덕터 전압과 변압기 전류

Fig. 5. Inductor Voltage and Transformer Current.

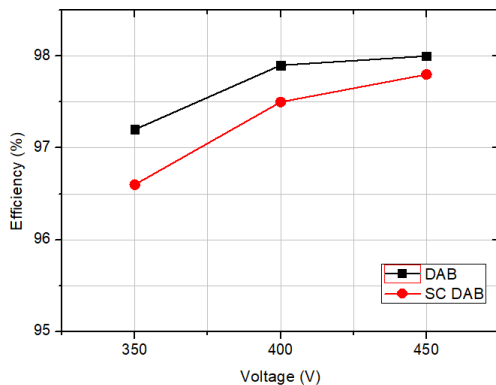


그림 6. 컨버터 효율

Fig. 6. Efficiency Curve

### 3. 실험결과

제안한 컨버터의 성능 검증을 위해 표 2에 표기한 전기적 사양에 맞춰 시제품을 제작하여 실험을 진행하였다. 실험은 스위치(1, 3, 5, 7)의 듀티비는 0.495인 상태로 진행되었다. 그림 4는 스위치 전압 파형을 나타낸다. 스위치 1, 3에는 각각 입력과 출력 전압이 걸리는 것과, 나머지 스위치에는 입력과 출력 전압의 절반이 인가되는 것을 알 수 있다. 그림 5는 불평형한 게이트 신호일 때, 제안한 컨버터와 기존 DAB 컨버터의 변압기 전류와 누설 인덕터 전압이다. 제안한 컨버터의 게이트 신호는

0.495와 0.485이며, 기존의 DAB 컨버터의 게이트 신호는 0.5와 0.49이다. 기존의 컨버터는 적은 전력에서 포화양상이 보이는 것에 반해, 제안한 컨버터는 전력을 최대로 올리더라도 포화되지 않는다. 그림 6은 제안한 컨버터와 기존 DAB의 입력전압 변동에 따른 효율을 나타낸다.

### 4. 결론

본 논문에서는 기존의 DAB 컨버터에서 풀 브릿지 구조를 Split Capacitor 구조로 바꾼 회로를 제안하였다. 이의 변압기와 스위치는 기존보다 낮은 정격 전압을 가지며, 그로 인해 ZVS에 필요한 에너지를 줄인다. 또한 제안한 컨버터는 스위치의 신호가 평형을 이루지 못하더라도 변압기 포화 없이 정상적으로 동작 한다. 이는 3 kW의 시제품을 통한 실험으로 검증되었다.

이 논문은 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 연구되었음  
(No. 20174030201490)

### 참고 문헌

- [1] S. M. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez, and A. Emadi, "Energy Storage Systems for Automotive Applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 6, pp. 2258-2267, Jun. 2008.
- [2] C. Zhao, S. D. Round, and J. W. Kolar, "An Isolated Three Port Bidirectional DC DC Converter With Decoupled Power Flow Management," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 5, pp. 2443-2453, Sep. 2008.
- [3] F. Z. Peng, H. Li, G. J. Su, and J. S. Lawler, "A new ZVS bidirectional DC DC converter for fuel cell and battery application," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 1, pp. 54-65, Jan. 2004.
- [4] M. Arias, P. and D. G. Lamar, F. F. Linera, D. Balocco, A. A. Diallo, and J. Sebastian, "Design of a Soft Switching Asymmetrical Half Bridge Converter as Second Stage of an LED Driver for Street Lighting Application," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 3, pp. 1608-1621, Mar. 2012.
- [5] W. Li, H. Y. He, X. He, Y. Sun, F. Wang, and L. Ma, "Series Asymmetrical Half Bridge Converters With Voltage Auto balance for High Input Voltage Applications," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 8, pp. 3665-3674, Aug. 2013.
- [6] Allan Taylor, Guanliang Liu, Hua Bai, Alan Brown, Philip Mike Johnson, and Matt McAmmond, "Multiple Phase Shift Control for a Dual Active Bridge to Secure Zero Voltage Switching and Enhance Light Load Performance" IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 6, Jun. 2018.