

# Dual-Active-Bridge 컨버터의 위상 천이 제어기법 비교 분석

정현우, 김이삭, 장원용, 윤지현, 김민우, 이승준, 이채연, 박정욱  
연세대학교

## Comparative Analysis of Phase-Shift Control Methods for Dual-Active-Bridge Converter

Hyeonwoo Jung, Issac Kim, Won-Yong Jang, Jihyeon Yun, Minwoo Kim, Seungjun Lee, Chaeyeon Lee, Jung-Wook Park  
Yonsei University

### ABSTRACT

Dual-active-bridge (DAB) 컨버터의 제어기법의 종류로는 single-phase-shift (SPS) 제어와 dual-phase-shift (DPS) 제어가 있다. 본 논문에서는 두 기법의 위상 천이 비율에 따른 전압 이득 특성을 비교하고, 스위칭 손실 저감을 위한 영 전압 스위칭 영역을 1차 측 전류를 통해 비교·분석한다. 또한, PSIM 시뮬레이션을 통해 분석의 유효성을 검증하고 두 제어기법의 효율을 비교한다.

### 1. 서론

기후변화로 인한 탄소 중립 정책으로 분산 전원의 도입이 증가함에 따라 energy storage system (ESS)나 vehicle to grid (V2G) 기술과 같이 양방향 동작이 가능한 컨버터가 주목 받고 있다. 이러한 컨버터 중 dual-active-bridge (DAB) 컨버터는 1차 및 2차 측 스위치 모두 zero voltage switching (ZVS) turn on 동작이 가능해 스위칭 손실을 줄일 수 있다는 특징이 있다.<sup>[1]</sup>

본 논문에서는 DAB 컨버터의 위상 천이 제어기법 중 single-phase-shift (SPS) 제어와 dual-phase-shift (DPS) 제어에 대한 전압 이득 특성과 ZVS 영역을 분석하고 PSIM 시뮬레이션을 통해 3 kW DAB 컨버터를 설계하여 두 제어기법의 효율을 비교한다.

## 2. SPS 제어와 DPS 제어 비교·분석

### 2.1 SPS 제어와 DPS 제어 동작 파형

그림 1은 DAB 컨버터의 토폴로지를 나타낸다. SPS 제어와 DPS 제어는 1차 측 스위치와 2차 측 스위치의 위상 천이율,  $D$ 를 통해 출력 전압을 제어할 수 있다. 또한, DPS 제어는 1차 및 2차 측 leading leg와 lagging leg 간의 위상 천이율,  $D_1$ 을 조절하여 1차 측 전류,  $i_p$ 의 피크를 조절할 수 있고 1차 측 스위치와 2차 측 스위치의 위상 천이율,  $D_2$ 를 통해 출력 전압을 제어할 수 있다. 이때  $D_1$ 과  $D_2$ 의 합이 1보다 크면  $D_1$ 의 크기에 따라 조류의 방향이 바뀌는 구간이 발생하기 때문에  $D_1$ 과  $D_2$ 의 합은 1 이하로 유지되어야 한다.<sup>[2]</sup> SPS 제어와 DPS 제어 시 동작 파형을 나타내면 그림 2와 그림 3과 같다.

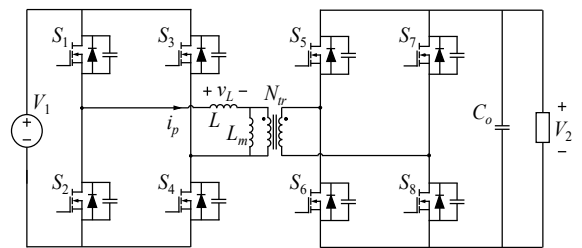


그림 1 DAB 컨버터의 토폴로지  
Fig. 1 Topology of DAB converter

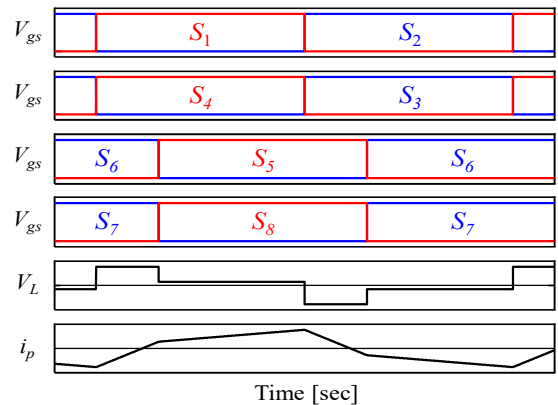


그림 2 DAB 컨버터의 SPS 제어 시 동작 파형  
Fig. 2 Waveforms of DAB converter under SPS control

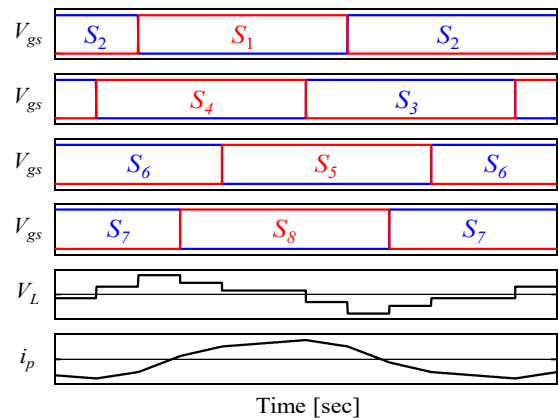


그림 3 DAB 컨버터의 DPS 제어 시 동작 파형  
Fig. 3 Waveforms of DAB converter under DPS control

## 2.2 SPS 제어와 DPS 제어 전압 이득

DPS 제어 시 DAB 컨버터의 출력 전압은 1차 측 풀브릿지 회로의 출력 유효전력과 부하가 소모하는 유효전력을 비교하여 식 (1) 및 (2)로 유도할 수 있다. SPS 제어 시 출력 전압은 식 (1)에서  $D_1$ 에 0을 대입해 구할 수 있다.

$$V_2 = \frac{N_{tr} V_1 R}{2f_s L} [D_2(1-D_2) - \frac{1}{2}D_1^2], \quad 0 \leq D_1 \leq D_2 \leq 1 \quad (1)$$

$$V_2 = \frac{N_{tr} V_1 R}{2f_s L} D_2(1-D_1 - \frac{1}{2}D_2), \quad 0 \leq D_2 \leq D_1 \leq 1 \quad (2)$$

## 2.3 SPS 제어와 DPS 제어 ZVS 영역

DAB 컨버터는 위상 천이 제어 시 스위칭 손실을 줄일 수 있는 ZVS turn on 동작이 가능하다. 스위치가 ZVS turn on 동작을 하기 위해서는 1차 측 누설 인덕터에 저장된 에너지가 충분해야 하고, 스위치의 on 동작 전 body diode가 켜져야 한다. 즉,  $i_p$ 가 양수일 때  $S_2, S_3, S_5, S_8$ 이 ZVS turn on 될 수 있고,  $i_p$ 가 음수일 때  $S_1, S_4, S_6, S_7$ 이 ZVS turn on 될 수 있다. 이를 통해 DPS 제어 시 모든 스위치가 ZVS turn on 될 수 있는 전압 이득  $G(=N_{tr}V_2/V_1)$ 의 범위를 식 (3)과같이 유도할 수 있다. 식 (3)에서  $D_1$ 에 0,  $D_2$ 에  $D$ 를 대입하여 SPS 제어 시 모든 스위치가 ZVS turn on 될 수 있는 조건 또한 얻을 수 있다.

$$\frac{1-D_1}{1+D_1-2D_2} \geq G \geq \frac{1+D_1-2D_2}{1-D_1}, \quad D_1 \leq D_2 \quad (3)$$

그림 4는 식 (1), (2) 및 (3)을 통해 위상 천이 제어 시 DAB 컨버터의 전압 이득과 ZVS 경계를 나타낸 그림이다. ZVS 경계(초록색 곡면)보다  $D_2$ 가 더 큰 영역에서 동작할 경우 모든 스위치가 ZVS turn on 될 수 있다.

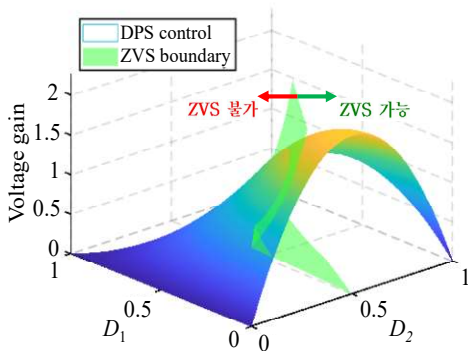


그림 4 DAB 컨버터의 위상 천이 제어 시 전압 이득 및 ZVS 경계  
Fig. 4 Voltage gain and ZVS boundary of DAB converter under phase-shift controls

## 2.4 PSIM 시뮬레이션

표 1은 PSIM에서 구현한 3 kW DAB 컨버터의 파라미터이고, 그림 5는  $D_1$ 을 0, 0.1, 0.2, 0.3으로 설정하여 출력 전력에 따른 효율을 계산한 그림이다.  $D_1$ 이 0.3인 경우  $D_2$ 가  $D_1$ 보다 작아져 ZVS 영역 밖에서 동작하기 때문에 다른 경우에 비해 낮은 효율을 보인다. 또한 DPS 제어 시 ZVS turn on이 가능하고,  $i_p$ 의 피크가 SPS 제어 시에 비해 낮은 경우 SPS 제어보다 높은 효율을 보인다.

표 1 DAB 컨버터 회로 설계 사양  
Table 1 Parameters of DAB converter

Parameter	Value
1차 측 전압 ( $V_1$ )	380 [V]
2차 측 전압 ( $V_2$ )	420 [V]
스위칭 소자	IXTK102N65X2
스위칭 주파수 ( $f_s$ )	80 [kHz]
변압기 턴수비 ( $N_{tr}$ )	19:21
누설 인덕턴스 ( $L$ )	60 [ $\mu$ H]
자화 인덕턴스 ( $L_m$ )	1 [mH]
2차 측 커패시턴스 ( $C_o$ )	200 [ $\mu$ F]

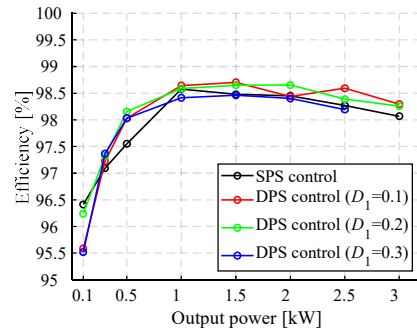


그림 5 DAB 컨버터의 위상 천이 제어 시 효율  
Fig. 5 Efficiency of DAB converter under phase-shift controls

## 3. 결론

본 논문에서는 DAB 컨버터의 SPS 제어와 DPS 제어 시 컨버터의 동작과 ZVS 영역에 대한 분석을 진행하고 PSIM 시뮬레이션을 통해 효율을 비교·분석한다. DPS 제어는 1차 측과 2차 측의 위상 천이율이 1차 및 2차 측 leading leg와 lagging leg 간의 위상 천이율보다 커야 한다는 제한이 있지만, 1차 측 누설 인덕터에 흐르는 전류의 피크를 줄일 수 있어 SPS 제어보다 높은 효율로 동작할 수 있다는 장점이 있다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2020R1A3B2079407).

## 참고 문헌

- [1] P. He and A. Khaligh, "Comprehensive analyses and comparison of 1 kW isolated DC-DC converters for bidirectional EV charging systems," *IEEE Trans. Transport. Electrification*, vol. 3, no. 1, pp. 147-156, Mar. 2017.
- [2] X. Liu, Z. Q. Zhu, D. A. Stone, M. P. Foster, W. Q. Chu, I. Urquhart and J. Greenough, "Novel Dual-Phase-Shift Control With Bidirectional Inner Phase Shifts for a Dual-Active-Bridge Converter Having Low Surge Current and Stable Power Control," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 5, pp. 4095-4106, May 2017.