

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, Chaeyon 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.^[1]

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.^[2] SPS 제어와 DPS 제어 시 동작 파형을 나타내면 그림 2와 그림 3과 같다.

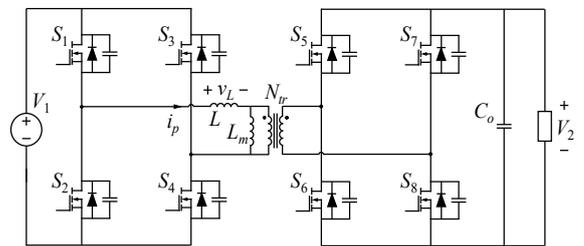


그림 1 DAB 컨버터의 토폴로지
Fig. 1 Topology of DAB converter

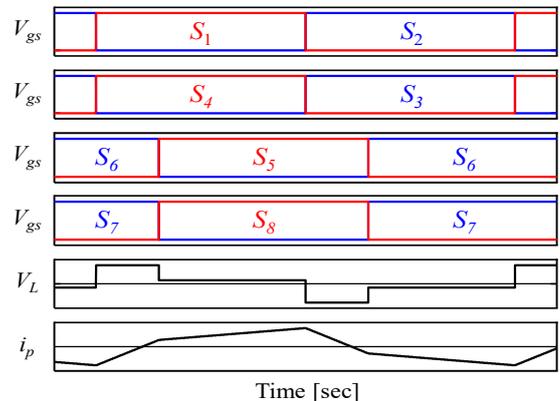


그림 2 DAB 컨버터의 SPS 제어 시 동작 파형
Fig. 2 Waveforms of DAB converter under SPS control

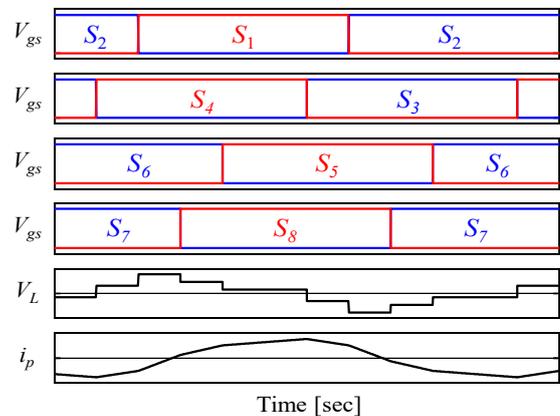


그림 3 DAB 컨버터의 DPS 제어 시 동작 파형
Fig. 3 Waveforms of DAB converter under DPS control

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.

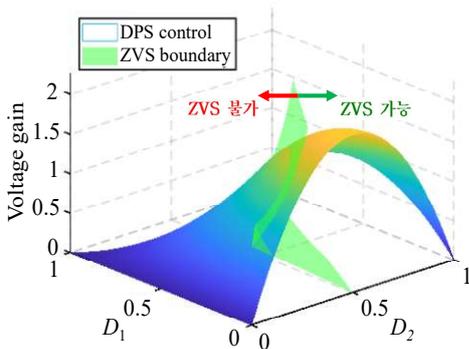


그림 4 DAB 컨버터의 위상 천이 제어 시 전압 이득 및 ZVS 경계
Fig. 4 Voltage gain and ZVS boundary of DAB converter under phase-shift controls

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 [μ H]
자화 인덕턴스 (L_m)	1 [mH]
2차 측 커패시턴스 (C_o)	200 [μ F]

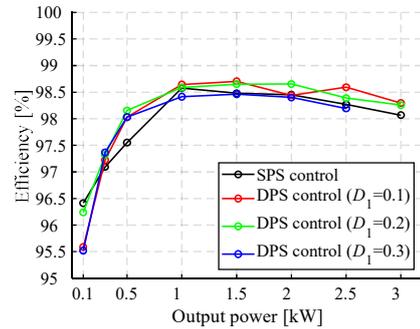


그림 5 DAB 컨버터의 위상 천이 제어 시 효율

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.