

듀얼 액티브 브리지 컨버터의 돌입 전류 및 스타트업 시간 저감을 위한 새로운 스타트업 전략

김시원, 김지연, 김재국
인하대학교, 전기공학과

New Start-up Strategy for Dual-Active Bridge (DAB) Converter With Reduced Inrush Current and Start-up Time

Si-Won Kim, Ji-Yeon Kim, Jae-Kuk Kim

Department of Electrical Engineering, Inha University, Incheon, Korea

ABSTRACT

본 논문은 DAB (Dual-Active Bridge) 컨버터의 새로운 스타트업 전략을 제안한다. DAB 컨버터의 제어 방식인 SPS (Single Phase Shift)는 스타트업 시 인덕터에 큰 전압이 반주기동안 인가되어 돌입 전류가 발생한다. 이러한 돌입 전류는 시스템의 소자를 파괴할 수 있어 반드시 제거되어야 한다. 기존 스타트업 방식은 추가적인 제어 변수를 사용해 극전압에 영전압인 구간을 추가함으로써 큰 전압이 인덕터에 인가되는 시간을 줄여 돌입 전류를 제거한다. 또한, TZM-EPS (TrapeZoidal Modulation - Extended Phase Shift)와 TPS (Triple Phase Shift)를 전압 구간별로 적용하는 전략을 통해 스타트업 시간을 저감한다. 하지만, TPS의 경우 낮은 출력 전류를 가져 스타트업 시간이 길어진다는 단점이 있다. 본 연구에서는 8개의 스위치가 모두 ZVS (Zero-Voltage Switching)를 달성하고 스타트업 시간을 저감할 수 있는 전략을 제안한다. 제안하는 스타트업 전략의 유효성은 100 V 입력과 100 V 출력을 갖는 600 W 프로토타입을 통하여 검증되었다.

1. 서론

최근 환경 문제에 관한 관심이 증가함에 따라 신재생 에너지와 전기자동차가 주목받고 있다. 신재생 에너지의 간헐적인 특성 때문에 이를 기반으로 하는 DC 배전 시스템은 안정적인 전력 계통을 위해 에너지 저장 장치를 필요로 한다. 이에 따라 전기자동차는 에너지 저장 장치로서의 역할이 강조되고 있으며 전기자동차에서 배전으로 전력을 전달하는 Vehicle-to-Grid (V2G) 기술이 개발되고 있으며 에너지 저장 장치로서의 역할을 수행하기 위해 전기자동차 탑재형 충전기는 양방향 전력 전달 능력 및 빠른 스타트업을 요구한다.

DAB 컨버터는 그림 1과 같이 4개의 1차측 스위치, 1개의 인덕터, 1개의 변압기, 4개의 2차측 스위치로 구성되며 ZVS가 가능하여 높은 효율을 달성할 수 있다. SPS는 1, 2차측 브리지 간의 위상차인 D_{ϕ} 를 조절하여 출력 전압을 제어할 수 있으며 쉽고 간단히 구현할 수 있어 널리 사용된다. 하지만, 전압 이득이 1에서 멀어질수록 ZVS 특성이 악화되어 스위칭 손실이 증가하고 EMI 문제가 발생할 수 있으며 스타트업 시 큰 돌입 전류가 발생한다. 이러한 돌입 전류는 시스템의 소자를 파괴할 수 있어 반드시 제거되어야 한다.

또한, SPS는 빠른 동적 성능을 가지고 있지만 돌입 전류를

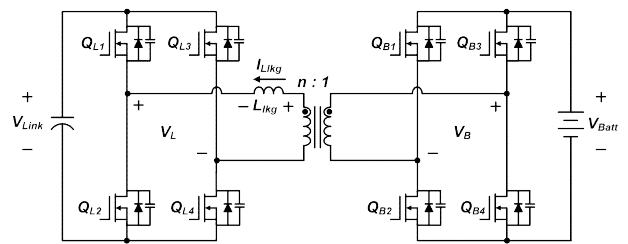


그림 1 듀얼 액티브 브리지 (DAB) 컨버터
Fig. 1 Circuit diagram of DAB converter

제거하기 위해 스타트업 시 다른 제어 기법을 사용함으로써 느린 동적 성능을 가지게 된다. 따라서, 전기자동차가 빠른 동적 성능을 요구하는 에너지 저장 장치로서의 역할을 수행하기 위해서는 스타트업 시간 저감이 필요하다.^{[2]-[3]}

스위칭 주파수의 증가는 자성체의 부피를 감소시켜 컨버터의 전력 밀도를 높일 수 있다. 이에 따라 DC/DC 컨버터의 전력 밀도를 높이기 위해 MOSFET이 널리 사용되고 있다. 그러나, MOSFET은 ZVS를 달성하지 못 할 경우 높은 스위칭 손실과 큰 di/dt로 인해 EMI 문제가 발생한다. 따라서, 스타트업 동안에도 신뢰할 수 있는 동작을 보장하기 위해서 MOSFET은 ZVS를 달성해야 한다.

본 논문에서는 TPS 보다 높은 출력 전류를 갖는 EZM-EPS (Equivalent ZVS current Modulation - Extended Phase Shift)를 이용하여 제어의 복잡도를 증가시키지 않으면서 8개 스위치가 모두 ZVS를 달성하고 스타트업 시간을 저감할 수 있는 전략을 제안한다.

2. 제안하는 스타트업 전략

2.1 SPS 방식을 적용했을 때의 돌입 전류

그림 2는 SPS로 동작하는 DAB 컨버터의 스타트업 시 파형이다. V_L 은 Link 브리지의 극전압이며, V_B 는 배터리 브리지의 극전압이다. i_{Lkg} 는 전력이 배터리에서 Link로 전달될 때의 인덕터 전류이다. 스타트업 시 V_{Link} 의 크기가 작아 인덕터 전압을 V_{Batt} 로 근사화할 수 있다. 발생하는 돌입 전류의 최댓값은 식 (1)과 같으며 배터리 전압과 전압이 인가되는 시간에 따라 달라지며 배터리 전압이 높은 V2G 상황에서 가장 큰 돌입 전류가 발생한다.

$$i_{Lkg} = V_{Batt} / 4f_s L_{Lkg}, (V_{Link} \approx 0) \quad (1)$$

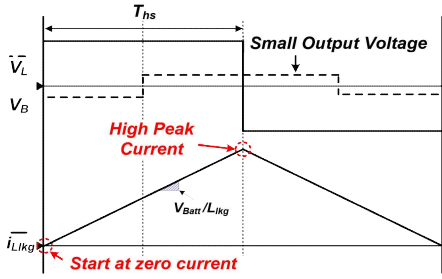


그림 2 SPS 방식의 스타트업시 극전압 및 인덕터 전류 파형
Fig. 2 Key waveforms at start-up with SPS

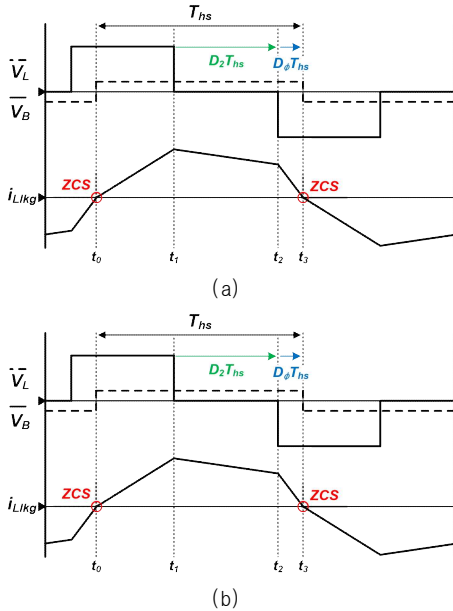


그림 3 기존 모드의 극전압 및 인덕터 전류 파형
(a) TzM-EPS (b) TPS
Fig. 3 Key waveforms of conventional modulations
(a) TzM-EPS (b) TPS

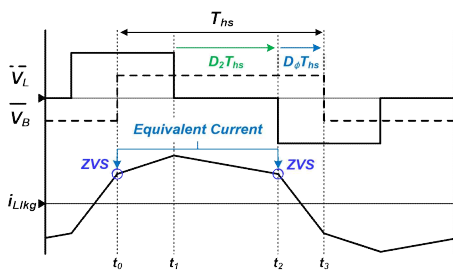


그림 4 제안하는 EZM-EPS의 극전압 및 인덕터 전류 파형
Fig. 4 Key waveforms of proposed EZM-EPS

1.2 기존 전략의 제어 방식들 (TzM-EPS, TPS)

기존 스타트업 전략은 스타트업 시간 및 돌입 전류를 저감하기 위해 TzM-EPS와 TPS를 혼합하여 사용한다. 그림 3(a)는 TzM-EPS의 극전압과 인덕터 전류 파형이다. TzM-EPS는 V_B 의 영전압 구간인 D_2 와 브리치간 위상차인 D_ϕ 2개의 제어 변수를 사용한다. 이때, V_L 과 $i_{L_{ikg}}$ 의 극성이 반주기 동안 일치하여 높은 출력 전류를 갖는다. 그림 3(b)는 TPS의 극전압과 인덕터 전류 파형이다. TPS는 V_B 와 V_L 모두 영전압인 구간이 나타나며 D_1 , D_2 , D_ϕ 3개의 제어 변수를 사용한다. EPS보다 많은 제어 변수를 가져 제어의 복잡도가 증가한다.

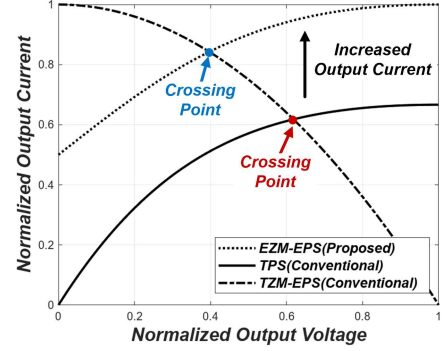


그림 5 각 제어 방식의 출력 전류
Fig. 5 Output current capability of each modulation

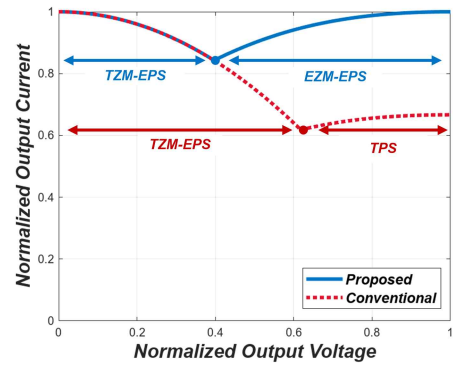


그림 6 충전 전략 비교
Fig. 6 Comparison of charging strategies

1.3 제안하는 제어 방식 (EZM-EPS)

그림 4는 제안하는 EZM-EPS의 극전압 파형과 인덕터 전류 파형이다. 식 (2)와 식 (3)을 통해 구해진 D_2 와 D_ϕ 로 제어 시, $i_{L_{ikg}}(t_0)$ 와 $i_{L_{ikg}}(t_2)$ 의 크기를 일치시킬 수 있고 8개의 스위치 모두 ZVS를 달성할 수 있으며 V_L 에 영전압인 구간이 없어 TPS보다 큰 출력 전류를 가져 스타트업 시간을 저감할 수 있다.

$$D_2 = (1-d)(1-D_\phi), (d = V_{Link}/nV_{Batt}) \quad (2)$$

$$D_\phi = (2d^2 - d + 1) / \{2(1 + d^2)\} \quad (3)$$

1.4 스타트업 시간 최소화를 위한 전략

그림 5는 SPS 최대 출력 전류를 기준으로 각 제어 방식의 출력 전류를 정규화한 그래프이다. TzM-EPS는 출력 전압이 증가함에 따라 출력 전류가 감소하고, TPS는 출력 전압이 증가함에 따라 출력 전류가 증가하며, EZM-EPS도 출력 전압이 증가함에 따라 출력 전류가 증가한다. 스타트업 시간을 최소화하기 위해서는 스타트업 동안 항상 최대 출력 전류를 갖는 제어 방식을 적용해야 하므로 각 모드의 교차점에서 모드 변환을 해야 한다. 이에 따라, 기존 전략은 그림 6의 빨간 점선과 같고 제안 전략은 파란 실선과 같다.

3. 실험 결과

제안하는 전략의 타당성을 검증하기 위해 100 V 입력, 100 V/6 A 출력 및 100 kHz의 스위칭 주파수 조건에서 프로토타입 컨버터를 제작하고 실험을 통해 검증하였다.

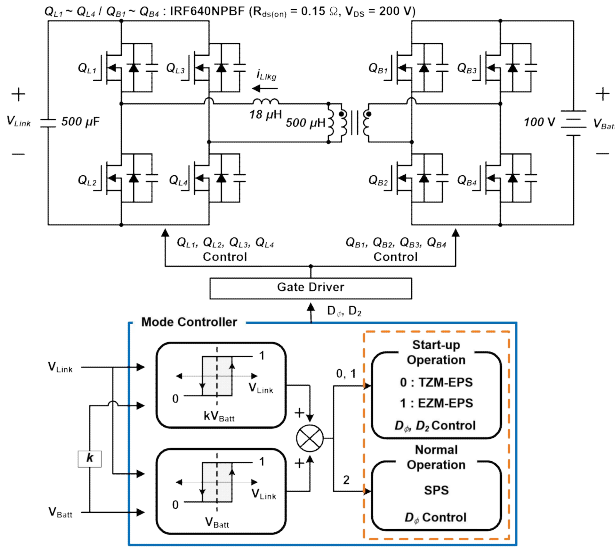


그림 7 제안하는 전략을 위한 제어 블록 회로도
 Fig. 7 Circuit and control block diagram for proposed strategy

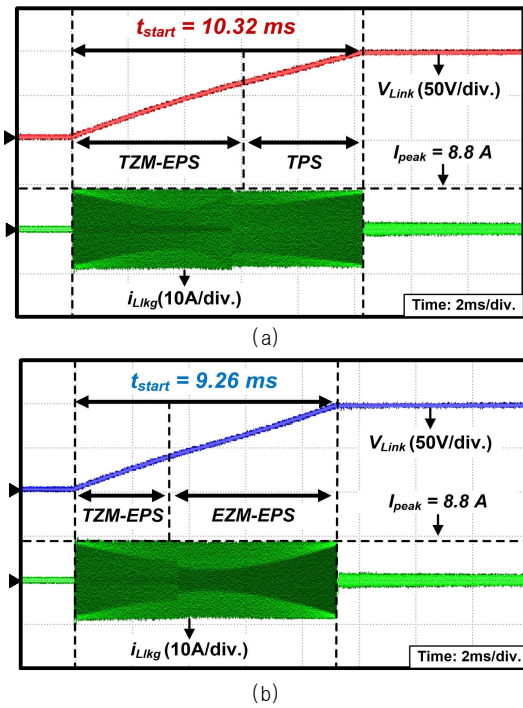


그림 8 스타트업 실험 파형 (a) 기존 (b) 제안
 Fig. 8 Key waveforms at start-up (a) Conventional (b) Proposed

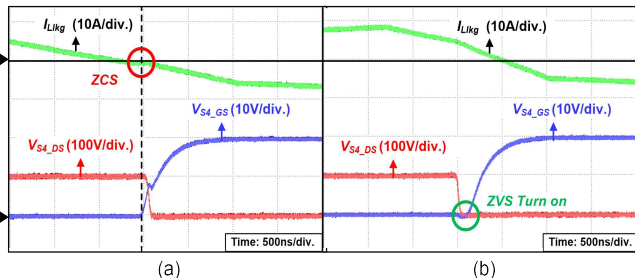


그림 9 ZVS 특성 실험 파형 (a) TPS (b) EZM-EPS
 Fig. 9 ZVS waveforms (a) TPS (b) EZM-EPS

그림 7은 프로토타입의 블록 다이어그램이다. 그림 7과 같이 본 논문에서는 V_{Link} 와 V_{Batt} 의 크기를 비교하여 전압 이득이 0.4 이하에서는 TZM-EPS로 동작하고 전압 이득이 0.4 보다 클 때는 EZM-EPS로 동작하도록 설계하였다. 그림 8은 각각 100 V 입력과 무부하 조건에서 기존과 제안하는 전략을 사용했을 때의 실험 결과를 나타낸다. 그림 8(a)와 같이, 기존 전략을 적용했을 때 돌입 전류가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있으며 스타트업 시간이 약 10.3 ms 인 것을 확인하였다.

그림 8(b)와 같이, 제안하는 전략을 적용했을 때도 돌입 전류가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있으며, 스타트업 시간이 약 9.3 ms 로 기존 대비 약 10% 감소함을 확인하였다. 그림 9는 100 V 입력과 V_{Link} 가 80 V 일 때 TPS와 EZM-EPS의 ZVS 특성 실험 파형이다. TPS의 경우 영전류가 발생하는 시점에서 스위칭 동작을 수행하는 것을 확인할 수 있으며, 제안하는 EZM-EPS는 ZVS를 달성하는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 돌입 전류 제거 및 스타트업 시간 저감을 위해 EZM-EPS 및 새로운 스타트업 전략을 제안한다. 기존의 전략은 돌입 전류 제거를 위해 추가적인 변수를 사용해 극전압에 영전압 구간을 추가하고 스타트업 시간을 저감하기 위해 TZM-EPS와 TPS 방식을 혼합하여 사용한다. 반면, 제안하는 전략은 TZM-EPS와 EZM-EPS를 사용함으로써 제어 변수의 수를 늘리지 않으며 8개의 스위치가 모두 ZVS가 가능하고 높은 출력 전류를 가져 스타트업 시간을 저감할 수 있다.

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역지능화혁신인재양성사업임(IITP-2024-RS-2023-00259678)

참고 문헌

- [1] L. Huang, P. Luo, C. Wang, and X. Zhou, "A high speed on-chip soft-start technique with high start-up stability for current-mode DC-DC converter," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 27579-27585, Feb. 2019.
- [2] D. Choi, M. Lee, T. Kim, J. -S. Kim, and G. -W. Moon, "Offset current modulation technique for wide ZVS range in dual active bridge (DAB) DC-DC converter," *IEEE Trans. Ind. Electronics*, vol. 71, no. 8, pp. 8741-8751, Aug. 2024.
- [3] 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.
- [4] J. Hu, S. Cui, and R. W. De Doncker, "Closed-loop black start-up of dual-active-bridge converter with boosted dynamics and soft-switching operation," *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 36, no. 10, pp. 11009-11013, Oct. 2021.