

양방향 위상 천이 풀브리지 컨버터의 역방향 동작을 위한 최적 게이트 구동 기법

김동민¹, 최동민¹, 채종윤², 심주연¹, 김준수¹, 문건우¹
한국과학기술원¹, 현대자동차²

Optimal Driving Scheme for Reverse Operation of Bidirectional Phase-Shift Full-Bridge Converter

Dongmin Kim¹, Dongmin Choi¹, Jongyoon Chae², Juyeon Sim¹, Joon-Su Kim¹, Gun-Woo Moon¹
KAIST¹, Hyundai Motor Company²

ABSTRACT

본 논문은 양방향 위상 천이 풀브리지(Phase-shifted Full-bridge, PSFB) 컨버터의 역방향 동작을 위한 최적 제어 기법을 제안한다. PSFB 컨버터는 역방향 동작 구현 시에 정방향 동작에서와 달리 지압 측의 동기 정류기에 큰 전압 발진이 발생하게 된다. 이를 억제하기 위해 최근 동기 정류기의 게이트 신호를 조절하는 등의 개선 방안이 제안되어 왔다. 하지만 이러한 기법들의 경우 입출력 전압 또는 부하 범위가 클 경우 효율 또는 전압 이득이 크게 저하되는 문제점이 발생할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 발생시키지 않으면서도 동기 정류기의 전압 발진을 억제할 수 있도록 하는 PSFB 컨버터의 최적 역방향 동작 기법을 제안한다. 제안하는 구동 기법은 정방향 3600 W, 역방향 500 W 급 양방향 차량용 저전압 DC/DC 컨버터 프로토타입을 통해 검증된다.

1. 서론

친환경 차량의 도입으로 인해 차량용 전력변환장치는 고효율화, 소형화, 경량화와 같은 주요 개발 목표를 갖게 되었다. 이러한 배경에서 전력변환장치의 동작 주파수를 증가시키거나 차세대 전력 반도체를 사용하여 소형화하는 등의 다양한 연구가 진행되고 있다. 최근에는 각각의 전력변환장치를 소형화하는 것을 넘어서 여러 전력변환장치를 통합하여 전체 시스템을 소형화하는 등의 연구도 검토되고 있다.

차량 내 전력변환장치의 기능을 통합하여 부피를 저감하는 측면에서 최근 프리차징이라는 기술이 도입되고 있다. 프리차징은 정방향 동작과 반대로 저전압 배터리를 통해 고전압 배터리와 인버터의 입력 커패시터 측에 전력을 공급하는 것을 의미한다. 기존 전력변환장치에서는 차량이 처음 시동할 때 고전압 배터리와 인버터가 결선되며 큰 돌입 전류가 발생한다. 기존 시스템에서는 이를 방지하기 위해 큰 부피와 무게를 차지하는 돌입 전류 억제 회로를 사용하였다. 하지만 프리차징 기술을 구현할 경우, 차량 시동 이전에 미리 인버터의 입력 커패시터를 충전하여 돌입 전류 자체가 발생하는 것을 방지할 수 있다. 즉 프리차징을 통해 돌입 전류 억제 회로를 제거하고 소형화, 경량화를 달성할 수 있다.

이러한 배경에서 최근 PSFB 컨버터의 역방향 동작 구현을 위한 연구들이 제안되고 있다. 하지만 PSFB 컨버터를 역방향으로 동작할 경우, 저전압 측 FET에 큰 전압 발진이 발생한다

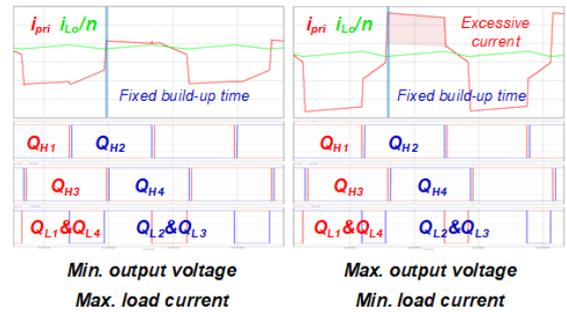


그림 2 PSFB 컨버터의 역방향 동작을 위한 게이트 구동 기법 및 한계점

는 문제점이 있다. 역방향 PSFB 컨버터를 정방향과 동일하게 게이트 구동할 경우, 그림 3(a)와 같이 lagging-leg FET의 턴오프 시점에서 트랜스포머 전류에 매우 큰 변동이 발생한다. 이는 트랜스포머에 전류가 부스트 전류에 의해 순간적으로 빌드업되기 때문이며, 이때의 큰 전류 에너지로 인해 누설 인덕턴스와 FET의 출력 커패시턴스가 크게 공진하여 전압 발진이 발생한다.

이를 해결하기 위해 최근 새로운 게이트 구동 기법이 제안되었으나 실제 LDC 사양에 적용하기에 여전히 한계점이 많다. 그림 2와 같이 [1]의 역방향 동작 기법을 사용하면 전압 발진은 제거할 수 있지만 특정 입출력 사양에서 과도하게 트랜스포머 전류가 빌드업되어 최대 출력, 효율, 발열 측면에서 여러 문제점이 발생한다.

본 논문은 기존의 전압 발진 억제 게이트 구동 기법을 피드백 제어를 통해 확장하고 최적화한다. 이는 LDC와 같이 넓은 입출력 범위의 어플리케이션에서도 최적 게이트 구동이 가능하도록 한다. 결과적으로 제안하는 기법은 전 범위에서 FET의 발진을 제거하면서도 설계의 악화를 야기하지 않는다.

2. 역방향 PSFB 컨버터의 최적 구동 기법

2.1 전압 발진 제거를 위한 최적 게이트 구동

역방향 PSFB 컨버터의 전압 발진을 제거하기 위해 [1]에서 새로운 게이트 구동 기법을 제시하였다. 이 구동 기법은 저전압 측 FET를 기존보다 일정 시간 더 일찍 턴온하는 것을 핵심으로 한다. 이 경우, lagging-leg 스위치의 턴오프 이전에 누

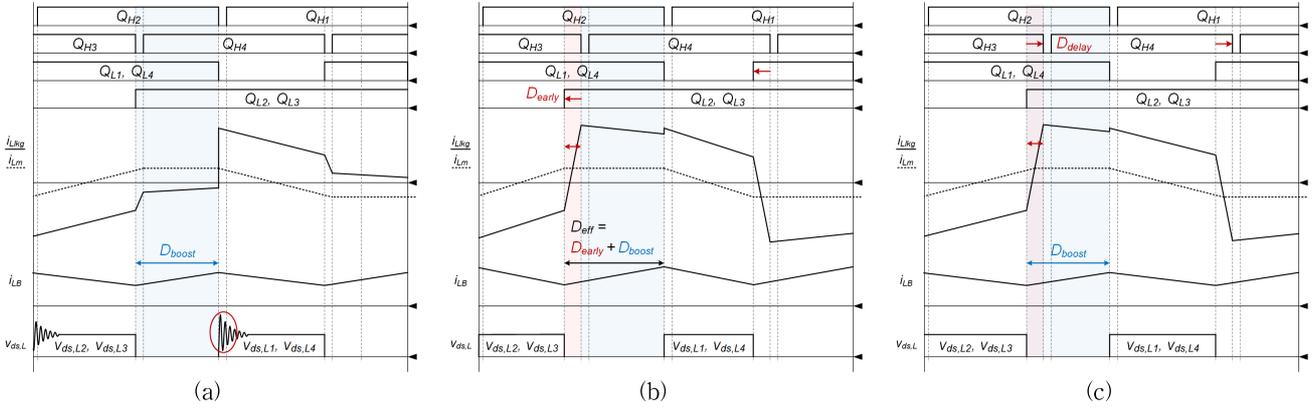


그림 3 위상 천이 풀브리지 컨버터의 역방향 구동을 위한 기존 및 제안하는 게이트 구동 기법, (a) 정방향과 동일 게이트 구동, (b) [ref]의 기존 게이트 구동 기법, (c) 제안하는 게이트 구동 기법, leading-leg 지연 변수 기반 피드백 제어

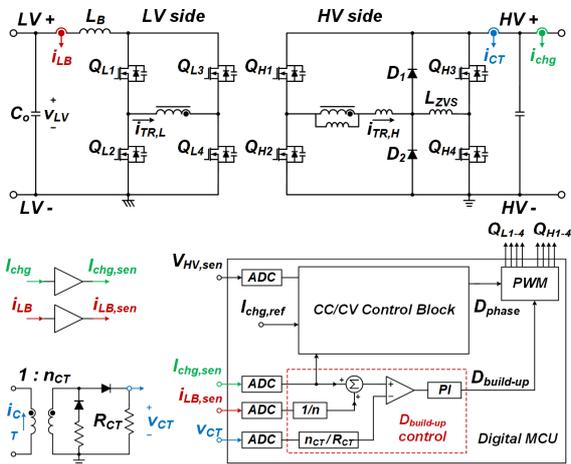


그림 4 역방향 위상 천이 풀브리지 컨버터 및 제안하는 지연 시간 피드백 제어 블록

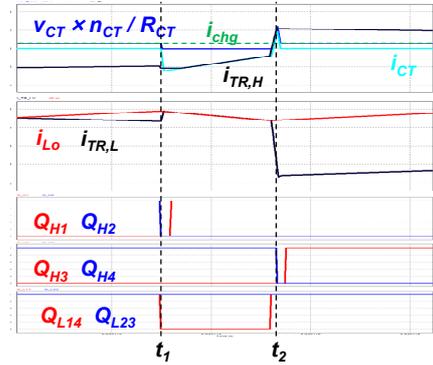


그림 5 빌드업 시비율 피드백 제어를 위한 센싱 시점

설 인덕턴스의 전류를 일정 수준 이상까지 사전에 빌드업할 수 있도록 하는 새로운 동작 모드가 추가된다. 따라서 누설 인덕턴스가 급격하게 빌드업되지 않아 저전압 측 FET의 전압 발진이 제거된다.

하지만 이 기존 방법은 넓은 입출력 범위에서 적용될 경우 설계의 악화와 효율 저감 등의 단점을 발생시킨다. 전류를 미리 빌드업하는 D_{early} (저전압 FET의 early turn-on 시비율)의 최적 값은 입출력 조건에 따라 달라진다. 특정 입출력 조건에서 D_{early} 이 최적값보다 작을 경우 전압 발진이 발생하며, 최적값보다 클 경우 과도하게 전류가 빌드업되어 손실 증가, 출력 전력 제한 등을 야기한다.

이러한 문제점을 극복하기 위해 제안하는 기법은 D_{early} 의 피드백 제어를 구현한다. 최적의 D_{early} 를 추종하도록 하여 모든 입출력 조건에서 전압 발진을 제거하면서도 최대 출력을 유지할 수 있다. 하지만 기존의 방식에서 피드백 회로를 추가하는 것으로는 이를 달성할 수 없다. 이미 출력의 제어를 위한 CC/CV 제어기가 존재하는 상황에서 다른 변수를 위한 제어기를 추가하게 될 경우 두 제어기는 완전히 분리(decoupling)되어 있어야 한다. 하지만 D_{early} 제어기는 CC/CV 시비율 제어기와 분리되지 않는다. 그림 3(b)와 같이 D_{early} 는 컨버터의 유효 시비율에 영향을 주기 때문에 이를 활용해 피드백 제어할 경우 출력 전압에도 영향을 주게 된다. 결과적으로 CC/CV 제어기와 D_{early} 제어기는 상호 발진을 야기한다.

반면 제안하는 기법은 이러한 문제점을 효과적으로 해결하고 최적 빌드업 구간 피드백 제어를 달성한다. 그림 3(c)의 제안하는 게이트 구동 기법에서는 전류 빌드업 구간을 D_{delay} (leading-leg FET의 지연 시비율)을 통해 구현한다. 특정 시점에서의 동작은 기존 방식과 동일하나, D_{delay} 의 경우 피드백 제어 변수로 활용 가능하다는 차이점을 가진다. D_{early} 와 달리 D_{delay} 는 컨버터의 유효 시비율에 영향을 주지 않는다. 즉 D_{delay} 의 값에 변동이 있더라도 출력은 변동하지 않는다. 즉, D_{delay} 는 CC/CV 시비율 제어기에 독립적인 제어 변수로 활용할 수 있다.

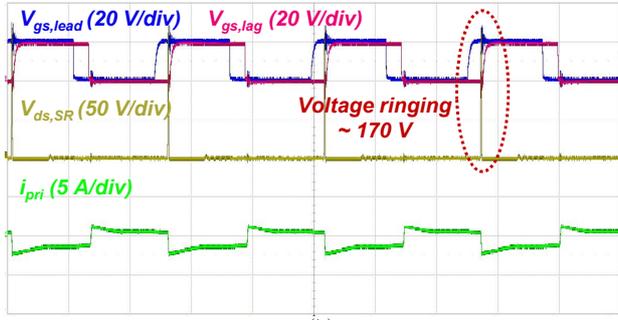
D_{delay} 제어 변수를 바탕으로, 제안하는 기법은 그림 4와 같은 블록 다이어그램을 통해 구현 가능하다. 제어기가 추가되었으나 기존 시스템에서 센서나 소자가 추가되지 않는다. CC/CV 및 peak current 제어를 위해 존재하는 기존의 센서들을 활용해 피드백 제어를 구현 가능하다.

제어의 구현을 위해서는 부스트 인덕터의 전류와 트랜스포머의 전류를 센싱해야 한다. 부스트 인덕터의 전류는 그림 5의 t_1 시점에서 저전압 측 전류 센서를 통해 센싱할 수 있다. 트랜스포머의 전류는 t_2 시점에서의 CT(Current Transformer) 전압과 고전압 측 출력 센서를 통해 간접적으로 센싱할 수 있다. 이를 수식적으로 정리하면 다음과 같다.

$$i_{TR,H}(t_2) = -i_{CT}(t_2) \frac{n_{CT} \cdot v_{CT}(t_2)}{R_{CT}} - i_{chg} \quad (1)$$

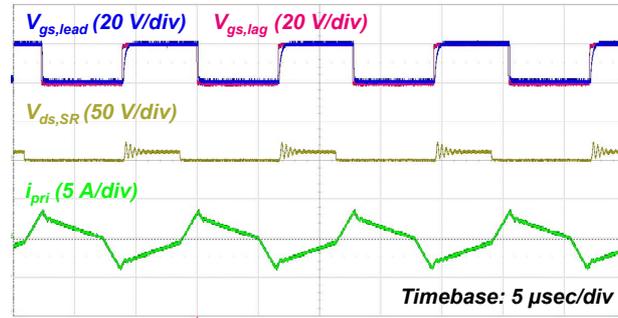
$$\frac{i_{LB}(t_1)}{n} = \frac{n_{CT} \cdot v_{CT}(t_2)}{R_{CT}} - i_{chg} \quad (2)$$

$$v_{CT}(t_2) = \frac{R_{CT}}{n_{CT}} \cdot \left(i_{chg} + \frac{i_{LB}(t_1)}{n} \right) \quad (3)$$

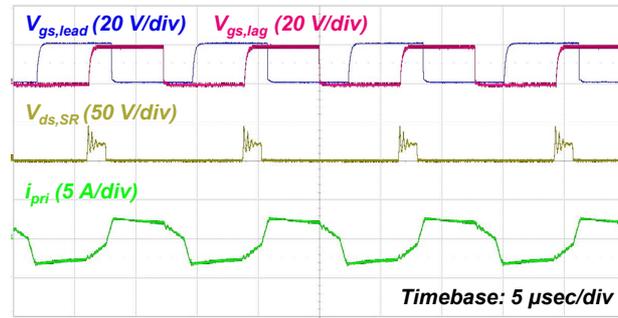


(b)

그림 6 전압 발진 억제 기법이 적용되지 않은 기존 역방향 PSFB 컨버터의 동작 파형



(a)



(b)

그림 7 제안하는 게이트 구동 기법을 적용한 역방향 PSFB 컨버터의 동작 파형, (a) 최소 전압 이득 조건, (b) 최대 전압 이득 조건.

2.2 실험 결과

제안하는 구동 기법은 정방향 3,600 W, 역방향 500 W 급 양방향 차량용 저전압 DC/DC 컨버터 프로토타입을 통해 검증되었다. 프로토타입의 입력 전압 범위는 11.5 - 15.5 V, 출력 전압 범위는 275 - 500 V이다. 동작 주파수는 78 KHz이다. D_{delay} 는 0.04 - 0.12의 범위 내에서 피드백 제어에 의해 가변된다.

그림 6은 전압 발진 억제 기법이 적용되지 않은 기존 PSFB 컨버터의 실험 파형이며, 그림 7은 제안하는 제어 기법을 적용한 프로토타입의 실험 파형이다. 그림 6의 기존의 역방향 PSFB 컨버터에서 약 170V 정도의 저전압 FET 전압 발진이 발생하는 것과 비교할 때, 제안하는 제어 기법이 효과적으로 전압 발진을 억제하는 것을 확인할 수 있다. 또한 모든 입출력 및 전압 이득 조건에서 효과적으로 최적의 D_{delay} 를 추종하는 것이 확인된다. 이로 인해 트랜스포머의 전류가 과도하게 빌드업되는 구간 없이 효율적으로 동작한다.

3. 결론

본 논문은 역방향 PSFB 컨버터를 과도한 전압 발진 없이 효율적으로 동작시키기 위한 새로운 게이트 구동 및 제어 기법을 제안한다. 기존의 트랜스포머 전류 사전 빌드업을 통한 전압 발진 억제 기법을 보다 확장하여, 넓은 입출력 전압 범위의 양방향 LDC에도 효과적으로 적용할 수 있다. 최적 전류 빌드업 피드백 제어를 위해 새로운 제어 변수를 제시하며, 기존의 센서들만을 활용하여 제어기 구현이 가능하다. 제안하는 기법을 통해 모든 입출력 조건에서 최적의 전류 빌드업 시비율을 추종함을 실험을 통해 검증하였다. 결과적으로 제안하는 기법을 통해 높은 최대 출력과 효율을 가지는 역방향 PSFB 컨버터 동작을 구현할 수 있다. 제안하는 기법은 프리차징 기능을 포함한 양방향 LDC 구현에 있어서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

이 성과는 2023년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2021R1A5A1031868)

참고 문헌

- [1] M. Escudero, D. Meneses, N. Rodriguez, and D. P. Morales, "Modulation Scheme for the Bidirectional Operation of the Phase-Shift Full-Bridge Power Converter," IEEE Trans. on Power Electronics, 2020.
- [2] Bal, S., Yelaverthi, D. B., Rathore, A. K., and Srinivasan, D. "Improved Modulation Strategy Using Dual Phase Shift Modulation for Active Commutated Current-Fed Dual Active Bridge,," IEEE Trans. on Power Electronics, 2018.