

순환 전류를 저감 시킬 수 있는 보조 Coupled-inductor를 사용한 영-전압 스위칭 interleaved 벡-컨버터

이제현, 조보형

서울대학교 전기 정보 공학부

Zero-Voltage Transition Interleaved Buck Converter with an Auxiliary Coupled-Inductor

Je-Hyun Yi, Bo-Hyung Cho

School of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 interleaved 벡-컨버터를 영-전압 스위칭으로 구동하기 위한 새로운 회로를 제안한다. 제안하는 회로는 두 개의 벡-컨버터 모듈과 보조 회로로 구성된다. 보조 회로는 coupled-inductor와 커패시터로 구성된다. Coupled-inductor에 흐르는 전류가 스위치가 꺼지기 전에 스위치의 전류의 방향을 바꾸어서 영 전압 스위칭을 달성한다. 제안하는 회로는 보조 회로에 반도체 소자를 추가하지 않고 수동 소자만으로 구성되어 신뢰성의 저하를 막는다. 또한 수동 소자만으로 구성된 보조 회로로 인해 발생하는 도통 손실의 증가를 최소화 한다. 제안하는 회로는 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

벡 컨버터는 현재 가진 제품 및 산업용으로 가장 많이 사용되고 있는 컨버터 중 하나이다. 컨버터가 전달해야 하는 에너지가 증가함에 따라 도통 손실을 저감하기 위한 병렬 구성과 interleaving 제어 방식으로 구동하는 컨버터가 증가하고 있다. 병렬 컨버터는 도통 손실을 저감시킬 수 있지만 스위칭과 다이오드의 개수가 증가함에 따라 스위칭 손실이 증가한다는 단점이 존재한다. 이러한 병렬 컨버터의 효율 향상을 위해 병렬 컨버터의 스위칭을 영-전압 스위칭하기 위한 방법들이 존재한다.

반도체 소자를 사용하여 적절한 시간에 온-오프를 통하여 전류의 흐름을 제어하여 주 스위치를 영 전압 스위칭으로 동작시키는 회로가 존재한다.^[1] 하지만 보조 회로 내의 반도체 소자는 소프트-스위칭을 하지 못해 스위칭 손실과 EMI 문제를 발생시킬 수가 있어 신뢰성 문제를 야기할 수 있다. 이러한 문제가 발생하지 않기 위해 수동 소자만을 사용하여 스위치의 소프트 스위칭을 달성하는 방법이 존재한다.^[2] 이 방식은 병렬 모듈의 양단에 인덕터를 연결하여 인덕터에 저장된 에너지로 영 전압 스위칭을 얻는 방식이다. 하지만 이 방식은 스위치 전류가 첨두치를 유지하는 구간이 존재하여 순환 전류를 크게 증가시키고 이로 인해 회로의 도통 손실이 증가한다.

제안하는 병렬 벡-컨버터는 스위치의 영 전압을 얻기 위해 coupled-inductor와 커패시터로 구성된 새로운 회로를 제안한다. 제안하는 회로는 coupled-inductor의 전류로 인해 영 전압 스위칭을 달성할 수 있다. 뿐만 아니라 수동 소자를 사용한 회로로 인해 발생하는 도통 손실의 증가분을 최소화한다. 제안하는 회로는 시뮬레이션을 통해 검증한다.

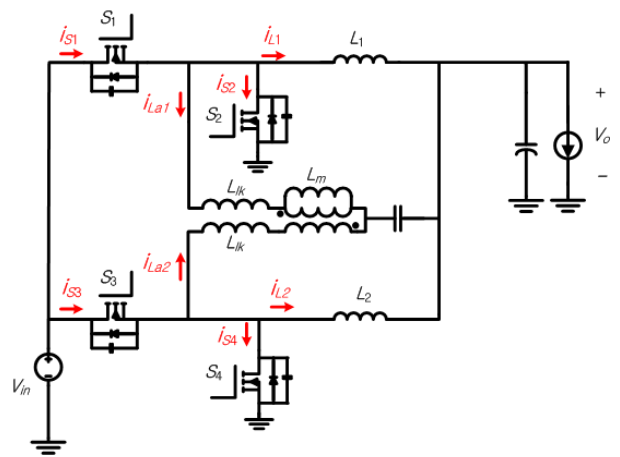


그림 1 제안하는 영 전압 스위칭 병렬 벡-컨버터
Fig. 1 A proposed soft-switching interleaved buck-converter with auxiliary coupled-inductor

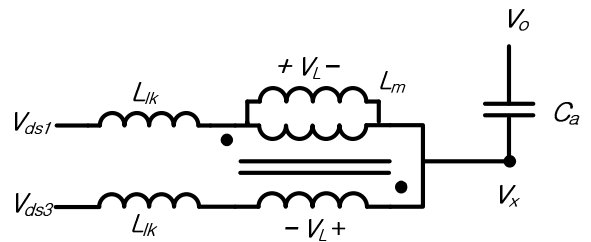


그림 2 제안하는 회로의 소프트-스위칭 셀
Fig. 2 Auxiliary soft-switching cell of proposed converter

2. 제안하는 회로의 구동

그림 1은 제안하는 소프트 스위칭 interleaved 벡 컨버터이다. 제안하는 회로는 두 개의 병렬 모듈과 수동 소자를 사용한 보조 회로로 구성되어 있다. 보조 회로는 같이 coupled inductor와 보조 커패시터로 구성되어 있다. coupled-inductor는 그림 2와 같이 이상적인 변압기와 자화 인덕터, 그리고 두 개의 누설 인덕터로 등가시킨다. 그림 2에서 커패시터의 전압은 $(1-D)V_o$ 와 같으며 커패시터는 직류 전압을 유지해 주는 DC-link 커패시터의 역할을 한다.

스위칭 모드에 따라 V_{ds1} 과 V_{ds3} 의 값이 0 혹은 입력 전압

이 되어 자화 인덕터와 이상적인 변압기에 걸리는 전압이 인가된다. 이에 따라 누설 인덕터의 전압이 결정되며 그 전압에 의해 누설 인덕터에 흐르는 전류가 결정된다. 이때 흐르는 전류의 크기가 영 전압 스위칭 조건을 결정한다. 만약 스위치의 턴-오프 시점에 누설 인덕터에 흐르는 전류가 인덕터에 흐르는 전류보다 커지게 되면 스위치의 전류 방향이 바뀌게 되고 그에 따라 벽 컨버터의 스위치가 소프트 스위칭으로 동작할 수 있게 된다.

누설 인덕터의 전압이 스위칭 모드에 따라 변함에 따라 전류는 그림 3과 같은 시뮬레이션 파형을 가지게 된다. 누설 인덕터 전류 파형은 총 네 개의 모드를 가지게 되며 스위치 전류 파형은 한 스위칭 주기 내에서 세 개의 동작 모드를 가지게 된다. 전류 파형을 결정하는 요인은 누설 인덕터와 자화 인덕터의 비이며 자화 인덕터를 누설 인덕터보다 크게 설계하면 그림 3과 같은 누설 인덕터 전류 파형을 얻을 수 있다. 전류 파형의 첫 번째와 세 번째 모드에서 기울기가 급격하게 떨어지는 구간이 생기게 되며 이 구간으로 인해 도통 손실을 저감시킬 수 있게 된다. 만약 누설 인덕터가 자화 인덕터보다 크게 된다면 첫 번째와 세 번째 모드에서 전류의 기울기가 완만하게 되어서 도통 손실의 저감 효과가 줄어들게 된다. 따라서 자화 인덕터의 값을 크게 설계하는 것이 도통 손실의 측면에서 유리하다. 이러한 조건에서 제안하는 회로의 스위치가 영 전압 스위칭하기 위한 누설 인덕터의 값을 결정할 수 있으며 그 값은 식 (1)과 같다.

$$L_{lk} < \frac{(D - \frac{1}{2}) V_0 T}{2(\frac{I_n}{2} - \frac{V_0}{L}(1-D)T)} \quad (1)$$

3. 시뮬레이션 결과

제안하는 회로의 검증을 위한 시뮬레이션 제원은 표 1과 같다. 그림 3은 시뮬레이션 파형이다. 0.5를 기준으로 시비율에 따라 대칭적인 파형이 나오기 때문에 시비율이 0.5보다 큰 경우에 대해서만 시뮬레이션을 진행하였다. 순서대로 스위치 1, 3의 게이트 전압, 인덕터 전류, 보조 coupled-inductor의 전류, 스위치의 전류를 도시하였다. 영 전압 스위칭을 위해서는 스위치의 오프 시점에 보조 인덕터의 전류가 인덕터 전류보다 커져서 스위치 전류의 방향이 바뀌어야 한다. 그림 3에서는 그 조건을 만족시키고 있고 그에 따라 스위치의 전류의 방향이 바뀌는 것은 확인 할 수 있다. 그에 따라 벽 컨버터의 스위치들이 영 전압으로 스위칭 하는 것을 그림 3에서 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 coupled-inductor를 사용한 소프트 스위칭 interleaved 벽 컨버터를 제안하였다. 영 전압을 위한 보조 회로는 coupled inductor와 DC-link 커패시터로 구성되어 있다. 제안하는 회로는 coupled-inductor의 전류를 통하여 모든 입, 출력 범위에서 스위치를 영 전압 스위칭으로 동작시킬 수 있다. 뿐만 아니라 수동 소자를 사용하는 보조 회로로 인해 발생하는 순환 전류를 최소화할 수 있다. 이로 인해 영 전압 스위칭을 위한 도통 손실의 증가를 최소화 할 수 있어 효율을 향상시킬 수 있다. 제안하는 회로는 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

표 1 제안하는 회로의 검증을 위한 시뮬레이션 값
Table 1 Simulation parameters of proposed circuit

변수	값	변수	값
출력 파워	500 W	입력 전압	145 V _{ac}
출력 전압	100 V _{dc}	인덕터	750 μH
출력 Cap.	100 μF	L _m	40 μH
주파수	100 kHz	L _{lk}	15 μH

참고 문헌

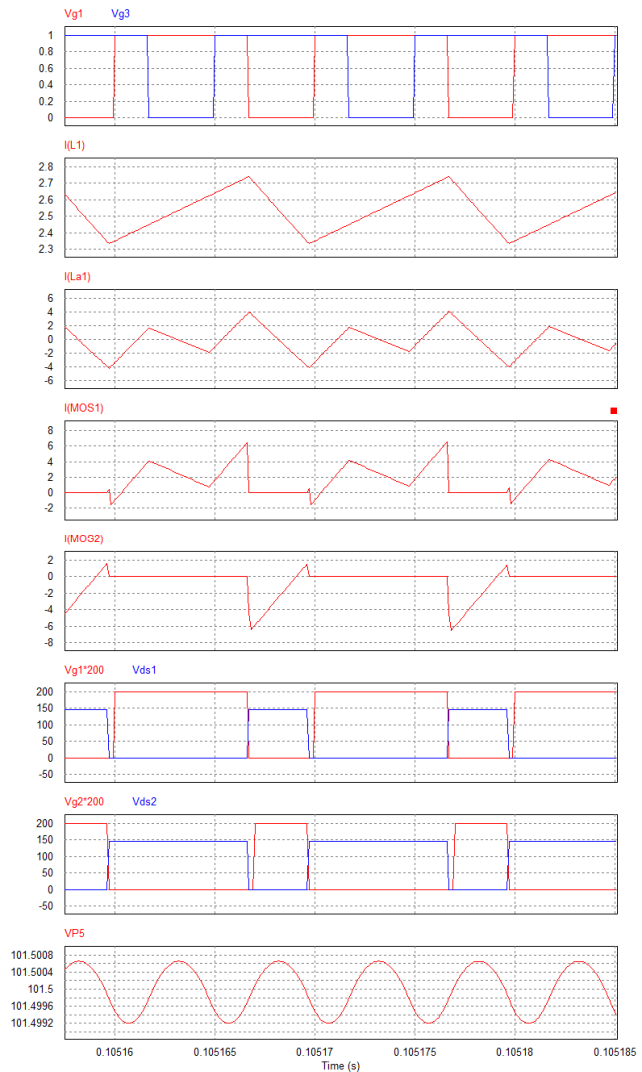


그림 3 제안하는 회로의 시뮬레이션 파형
Fig. 3 The simulation waveform of the proposed converter

- [1] M. R. Ahmed, G. Galderon-Lopez, F. Bryan, R. Todd, and A. J. Forsyth, "Soft-Switching SiC Interleaved boost converter," 2015 APEC, pp.941-947, Mar. 2015.
- [2] Majid Pahlevaninezhad, Pritam Das, Josef Drobnik, Praveen K. Jain, and Alireza Bakhshai, "A ZVS Interleaved Boost AC/DC Converter Used in Plug-in Electric Vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 8, pp. 3513-3529, Aug. 2012