

경부하에서 위상천이 폴브릿지 DC-DC 컨버터의 동작 분석

이선호, 박정욱
연세대학교

Analysis of DC-DC Phase-Shifted Full-Bridge Converter in Light Load Condition

Sunho Lee, Jung-Wook Park
Yonsei University

ABSTRACT

DC-DC 위상천이 폴브릿지 컨버터는 경부하 운용시에 영전압 스위칭이 발생하지 않아 큰 스위칭손실이 발생한다. 경부하에서 위상천이 폴브릿지 컨버터의 낮은 효율을 개선하기 위해 DCM (Discontinuous Conduction Mode) 동작을 이용한다. 본 논문은 경부하에서 위상천이 컨버터의 DCM과 CCM (Continuous Conduction Mode) 동작의 특성 및 도통 손실 절감을 위한 동기 정류기의 제어 방법을 이론적으로 분석하고, 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

가적인 소자로 인한 비용이 상승한다는 단점이 있다. 전류 불연속 모드(DCM) 동작을 이용하는 경우, 추가적인 소자 혹은 복잡한 제어 없이 경부하에서 영전압 스위칭이 가능해 효율을 증대시킬 수 있다. 다만, 전류 불연속 모드 동작의 경우, 동기 정류기에 역전류가 흐를 수 있어 이에 따른 적절한 제어가 필요하다.^{[1]-[2]}

본 논문은, 위상천이 폴브릿지 컨버터의 전류 연속 모드 동작과 전류 불연속 모드 동작을 비교하여, 낮은 부하에서의 영전압 스위칭에 대해 분석한다. 각 모드 동작에서의 적용되는 동기 정류기의 제어 방법을 분석하고, 이를 적용한 위상천이 폴브릿지 컨버터의 동작을 시뮬레이션을 통해 보인다.

1. 서론

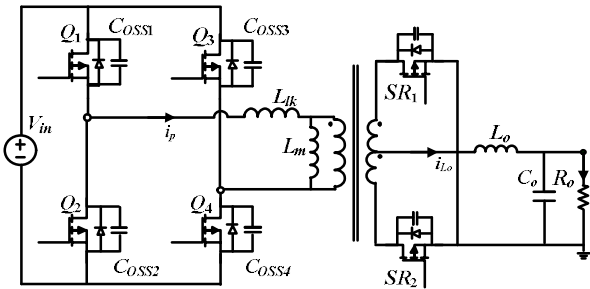


그림 1 위상천이 폴브릿지 DC-DC 컨버터
Fig. 1 Phase-Shift Full-Bridge DC-DC Converter

위상천이 폴브릿지 컨버터는 높은 효율로 전력변환이 가능해 서버 시스템, 대용량 배터리 충전 등의 대전력 어플리케이션에 주로 사용된다. 위상천이 폴브릿지 컨버터는 변압기의 누설 인덕턴스와 MOSFET 스위치의 기생 커패시턴스의 공진을 통한 1차 측 스위치의 영전압 스위칭을 통해 스위칭 손실을 절감시킬 수 있다. 또한, 그림 1과 같이 컨버터의 2차 측에 동기 정류기를 적용할 경우 다이오드를 사용할 때 보다 도통 손실을 절감시킬 수 있다.

하지만, 위상천이 폴브릿지 컨버터는 경부하 운용시에 1차 측 스위치의 영전압 스위칭 동작이 어려워 효율이 감소한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 1차 측에 스위치 혹은 보조 LC회로 추가를 통해 영전압 스위칭이 적용되는 범위를 늘릴 수 있지만, 제어가 복잡해지고 추

2. 위상천이 폴브릿지 DC-DC 컨버터

2.1 컨버터의 CCM / DCM 동작 비교

그림 2는 위상천이 폴브릿지 컨버터의 CCM, DCM 동작에 따른 파형 그래프이다. 컨버터가 경부하에서 동작할 때, 2차 측 출력 필터 인덕터에 흐르는 전류가 흐르지 않는 불연속인 구간이 존재한다. 이 구간은 2차 측에 전력이 전송되지 않는 freewheeling mode에 존재하고, CCM과 DCM 동작에서의 1차 측 전류는 아래와 같다.

$$i_{p,CCM}(t) \approx \frac{DV_{in}}{2L_m f_s} + \frac{1}{n} i_{L_o}(t) \quad (1)$$

$$i_{p,DCM}(t) \approx \frac{DV_{in}}{2L_m f_s} \quad (2)$$

컨버터의 지상 레그 (lagging-leg) 스위치는 출력 부하가 감소할수록 기생 커패시턴스를 충·방전시킬 수 있는 누설 인덕턴스의 에너지가 감소하기 때문에 영전압 스위칭을 만족하기 어렵다.

하지만, 부하가 낮아져서 위상천이 폴브릿지 컨버터가 DCM 동작을 할 경우 변압기의 누설 인덕턴스가 아닌 자화 인덕턴스가 기생 커패시턴스를 충·방전시키는 회로가 완성된다. 변압기의 자화 인덕턴스는 누설 인덕턴스보다 매우 크기 때문에 DCM 동작 시 경부하에서도 영전압 스위칭이 가능하다. DCM 동작 시에 낮은 출력 전류로 인해, 기생 커패시턴스가 충·방전되는 시간이 길기 때문에 이를 고려하여 1차 측 스위치에 긴 데드 타임을 설정하여야 한다.

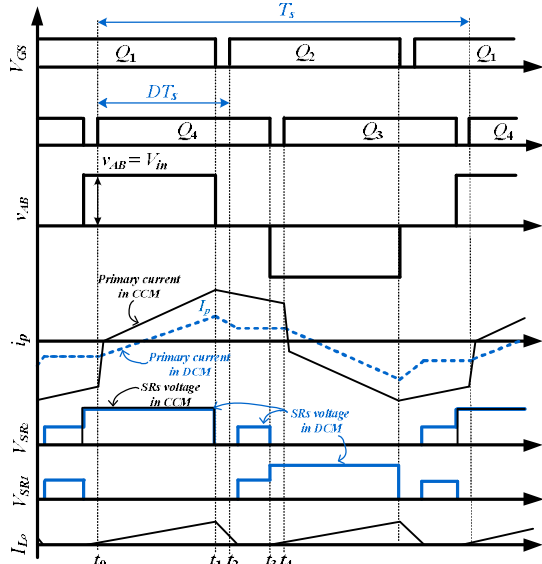


그림 2 전류 연속 / 불연속 모드에서의 컨버터 주요 파형
Fig. 2 Key waveforms on CCM / DCM operation

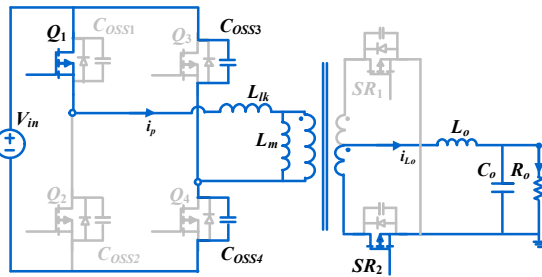


그림 3 지상 레그 스위치의 영전압 스위칭 회로
Fig. 3 Equivalent circuit of ZVS on lagging-leg switches

2.2 영전압 스위칭 동작 분석

영전압 스위칭 동작은 변압기의 누설 인덕턴스와 1차 측 스위치의 기생 커패시턴스의 공진에 의하여 이루어진다. 그림 3에서 보듯이, 공진 과정에서 스위치의 기생 커패시턴스가 각각 충·방전 된 이후, 스위치의 body-diode로 i_p 가 도통되어 영전압 스위칭이 이루어진다. 영전압 스위칭을 위해서는 커패시턴스의 충·방전을 위한 충분한 누설 인덕턴스 에너지가 필요한데, 위상천이 풀브릿지 컨버터의 CCM, DCM 동작 시 이에 따른 조건은 아래 식과 같다.

$$I_{p_CCM} \geq \sqrt{\frac{V_{in}^2 (2C_{oss})}{L_k}} \quad (3)$$

$$I_{p_DCM} \geq \sqrt{\frac{V_{in}^2 (2C_{oss} + (2C_{oss_SR} / n^2))}{L_m}} \quad (4)$$

2.3 동기 정류기 제어 비교

동기 정류기의 MOSFET은 양방향 스위치이기 때문에 경부하에서 DCM 동작 시 역전류가 흘러서 악영향을 끼칠 수 있다. 동기 정류기는 부하의 크기에 따라 ‘AND-control’ 혹은 ‘OR-control’을 주로 사용한다. 있다. CCM 동작 시 상대적으로 신호가 긴 ‘OR- Control’

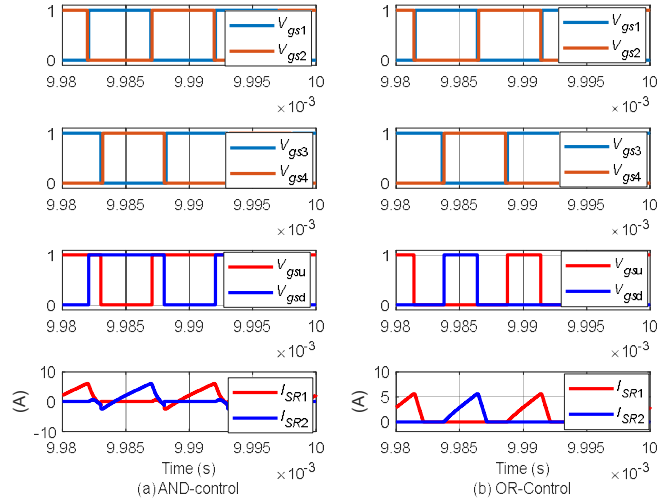


그림 4 동기 정류기 제어 방법에 따른 전류 파형
Fig. 4 Comparison of current waveforms according to synchronous rectifier control method

을, DCM 동작 시 역전류를 방지하기 위해 ‘AND-Control’을 사용한다. ‘OR-Control’ 사용 시, 전류가 스위치의 body-diode로 흐르는 구간이 짧아 도통 손실이 작지만 DCM 동작 시 출력 인덕터 전류가 흐르지 않는 구간에서 역전류가 흐를 수 있다. DCM 동작 시에 각각의 제어를 적용한 전류 파형을 그림 4에서 확인할 수 있다. 추가적으로, 부하가 매우 작은 범위에서는 스위치의 turn-off time에 흐를 수 있는 역전류를 고려하여, 동기 정류기를 끄고 body-diode로만 도통시키는 제어 방법을 사용한다.

3. 결론

위상천이 풀브릿지 DC-DC 컨버터는 경부하 운용시 낮은 효율을 개선하기 위해 DCM 동작을 이용한다. 이때, 1차 측 스위치에 긴 데드 타임을 적용하면 낮은 부하에서도 영전압 스위칭이 가능해 경부하에서도 효율 개선이 가능하다. 2차 측 동기 정류기의 경우, 보편적인 ‘OR-Control’을 경부하 조건에서 적용하면 역전류가 흐를 수 있기 때문에 ‘AND-Control’을 적용하여 운용한다.

이 논문은 2016년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구자지원(도약-전략)연구(No.2016R1E1A1A02920095)입니다.

참고 문헌

- [1] H. Li, Y. Yu, L. Zhao, and Y. Hou, “Operation analysis of a phase-shifted full-bridge converter during the dead-time interval,” *IET Power Electron.*, vol. 9, no. 9, pp. 1777–1783, 2016.
- [2] J. W. Kim, D. Y. Kim, C. E. Kim, and G. W. Moon, “A simple switching control technique for improving light load efficiency in a phase-shifted full-bridge converter with a server power system,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 4, pp. 1562–1566, 2014.