

듀얼모드 제어를 통한 DC/DC 위상천이 폴브릿지 컨버터의 과도상태 개선

이선호, 이현우, 장유남, 김이삭, 박정욱
연세대학교

A Dual-Mode Control of DC/DC Phase-Shift Full-Bridge Converter for Transient Response Improvement

Sunho Lee, HyunWoo Lee, Yu-Nam Jang, Issac Kim, Jung-Wook Park
Yonsei University

ABSTRACT

본 논문은 DC/DC 위상천이 폴브릿지 컨버터의 과도상태 개선을 위한 듀얼모드 제어를 제안한다. 기존의 discontinuous conduction mode (DCM)과 continuous conduction mode (CCM)을 이용하여 운용하는 위상천이 폴브릿지 컨버터는 각 모드의 상이한 전압개인의 특성을 고려하지 않아 급격한 로드 변동시 출력 전압의 언더슈트 혹은 오버슈트가 크게 발생한다. 제안하는 듀얼모드 제어는 DCM과 CCM 각 모드 별개로 제어가 적용되고 출력 전류의 변화에 대응하는 적응형 feed-forward 제어가 적용되어 컨버터의 과도상태를 개선할 수 있다. 듀얼모드 제어 방법의 성능과 타당성을 시뮬레이션을 통해 입증한다.

1. 서론

동기정류기를 적용한 DC/DC 위상천이 폴브릿지 컨버터는 ZVS 스위칭, 낮은 EMI 노이즈, 높은 전력밀도 및 효율 등의 장점이 있어 서버용 파워서플라이, 전기차량용 탑재형 충전기 등의 중, 대전력 어플리케이션에서 주로 사용된다. 하지만, 저부하시 2차 단계 역전류가 발생한다는 단점이 존재한다. 역전류는 2차 단계의 도통 손실을 증가시킬 뿐만 아니라, 1차 단계 전류에 투영되기 때문에 부하의 크기와 상관없이 컨버터가 전류 연속 모드 (continuous conduction mode)로 동작하여 변압기의 코어 손실로 인해 효율이 감소한다. 이를 해결하기 위해, 낮은 부하에서 동기정류기를 꺼서 컨버터를 전류 불연속 모드 (discontinuous conduction mode)로 동작시키는 제어 방법은 비단 위상천이 폴브릿지 컨버터 외에도 벅, 플라이백, 포워드 컨버터 등에도 많이 적용되어 사용 된다. DCM에서는 역전류가 흐르지 않아 코어 손실이 줄어들고 테드-타임을 증가시키는 방법을 통해 ZVS 특성도 유지 되기 때문에 저부하대의 효율을 증대시킬 수 있다.[1]-[2] 하지만, 위상천이 폴브릿지 컨버터의 전압-이득은 DCM과 CCM에서 서로 다른 특성을 보이기 때문에 DCM 제어 방법을 적용하면, 부하 변동 시에 출력 전압 변동으로 인한 동적 특성이 떨어진다는 단점이 있다. [1].

따라서, 본 논문은 컨버터의 동적 성능을 증대시키는 듀얼모드 제어를 제안한다. 제안하는 제어는 보편적으로 사용하는 전압모드제어를 개선하여 DCM과 CCM 모드 각각의 전압-개인 특성을 고려하여 컨버터를 제어한다. 상태 평균화법을 통해 각 모드의 부하에 따른 시비율을 미리 계산하여 급격한 부하 변동

시에도 빠른 응답을 갖는다. 더불어, 부하 변동으로 인한 상태 평균화 법의 오차를 보상하기 위해 피드포워드 제어 또한 포함한다. 본 논문은 위상천이 폴브릿지 컨버터의 각 모드의 동작을 분석하고 시뮬레이션을 통해 제안하는 제어 방법의 성능과 타당성을 검증한다.

2. 본문

2.1 위상천이 폴브릿지 컨버터의 DCM/CCM 동작분석

DC/DC 위상천이 폴브릿지 컨버터의 각 동작모드에 따른 시비율은 출력단 인덕터의 volt-sec 평형 조건에 의해 아래 식 (1), (2)와 같이 전개된다.

$$D_{DCM} = \sqrt{\frac{4L_o f_s I_o}{V_o / (nG_{DCM}) - I^2 - 1}} \quad (1)$$

$$D_{CCM} \approx \frac{nV_o}{2V_{in}} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 통해 부하에 따른 전압-이득 특성 그래프가 그림 1에 나타난다. DCM모드는 부하와 무관한 시비율을 갖는 CCM 모드와 달리 시비율이 부하에 따라 증가하는 경향을 보인다. 또한, 동일한 시비율에 대해 CCM모드 보다 큰 전압-이득 특성을 갖는다. 기존의 전압모드 제어는 각 모드의 상이한 전압-이득 특성을 고려하지 않기 때문에 컨버터의 동작이 DCM과 CCM의 경계를 넘는 급격한 출력전류 변동 시 출력전압의 순간적인 변동 폭이 크다.

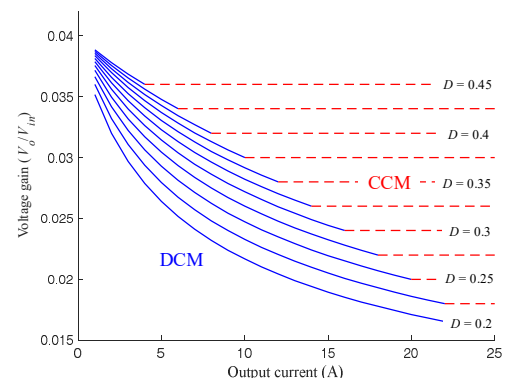


그림 1 동작 모드의 부하에 따른 전압-이득 특성 그래프

2.2 듀얼-모드 제어기

컨버터의 동적성능 개선을 위해 각 동작 모드의 전압-계인 특성을 고려한 듀얼모드 제어기의 구조는 그림 2에 나타난다. 컨버터의 부하에 따른 동작 모드는 식 (3)에 의해 결정된다.

$$I_{o, boundary} = \frac{V_o (V_{in} - n V_o)}{4 V_{in} L_o} T_s \quad (3)$$

결정된 동작 모드에 따라, 식 (1), (2)를 기반으로 시비율을 계산하여 스위칭 신호를 인가한다. 하지만, 부하 변동 시 순간적으로 출력단 인덕터의 volt-sec 평형조건이 만족하지 않기 때문에 적응형 피드포워드 제어에 의해 그 오차가 보상된다. 이 보상은 출력 전류의 변동시에만 적용되기 때문에 제어기의 안정도에 악영향을 끼치지 않는다.

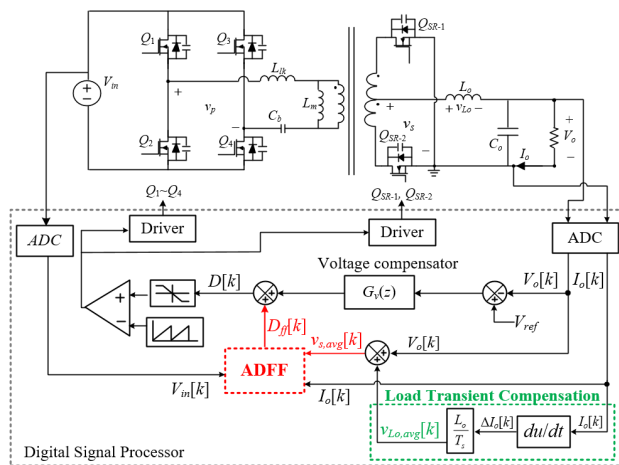


그림 2 듀얼모드 제어기의 구조 다이어그램

3. 시뮬레이션 결과

제안하는 듀얼모드 제어기의 성능과 타당성을 확인하기 위해 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 설계된 위상천이 풀브릿지 컨버터의 자세한 사양은 아래 표 1과 같다.

TABLE I. 표1. PSFB 컨버터의 설계 사양

Description	Values
입력 전압	400 V
출력 전압	12 V
정격 전력	600 W
스위칭 주파수	50 kHz
1차 단 스위치	MOSFET, 550 V/25 A
동기정류기 스위치	MOSFET, (60 V/50 A)
변압기 턴 수	25 : 1 : 1
자화 인덕턴스	1 mH
누설 인덕턴스	12.3 μH
출력단 인덕턴스	1.5 μH

듀얼모드 제어는 기존의 전압모드 제어와 동일하게 스위칭 주파수만큼의 제어주파수로 동작하며, 피드포워드 제어의 경우 1/5 값인 10 kHz로 동작 시켰다. 위상천이 풀브릿지 컨버터의 출력전류를 2 A에서 25 A로 변동시켰을 때 시뮬레이션 결과

는 그림 3에 나타난다. 식 (3)에 의해 동작 모드의 경계는 10 A이기 때문에, 컨버터는 DCM과 CCM으로 번갈아가며 동작한다. 제안하는 듀얼모드 제어의 최대 전압 변동폭은 0.6 V로, 기존 전압모드 제어의 최대 전압 변동폭인 1.6 V와 비교하였을 때 감소된 정착 시간과 더불어 컨버터의 동적 성능이 매우 향상되었음을 확인하였다. 특히 출력 전류가 증가하는 상황에서 그 정도가 매우 우수함을 확인할 수 있다. 또한, 출력단 인덕터의 최대 전류값은 50 A에서 38 A로 감소하였다.

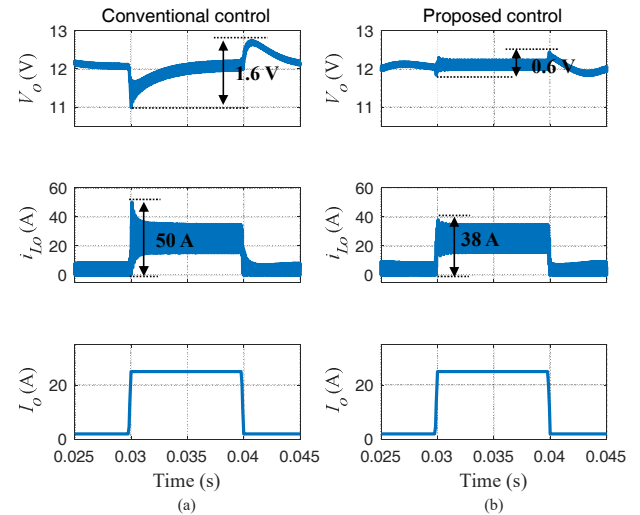


그림 3 시뮬레이션 결과: (a) 기존 전압모드 제어, (b) 제안하는 듀얼모드 제어

4. 결론

본 논문은 DC/DC 위상천이 풀브릿지 컨버터의 동적 특성을 개선하기 위한 듀얼모드 제어방법을 제안하였다. 제안하는 제어 방법은 부하에 따른 시비율을 미리 계산하고 부하에 대응하는 적응형 피드포워드 제어를 적용하여 부하 과동현상 시 빠른 제어응답과 우수한 동적특성을 보였다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R1A3B2079407)

참고 문헌

- [1] S. Lee, J. Lee, U. A. Khan, and J.-W. Park, "Novel Switching Control Method for Synchronous Rectifier of Phase-Shifted Full-Bridge Converter in Light-Load Conditions," in Proc. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Sep. 2019, pp. 1408-1413.
- [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, Apr. 2014.