

동기 정류 컨버터의 디지털 센서리스 모드 변환 방법

백종복, 최우인, 조보형
서울대학교 전기. 컴퓨터공학부

Digital sensorless mode transition method for Synchronous Converter

Jongbok Baek, Woo In Choi and Bohyung Cho
School of Electrical Engineering and Computer Science Seoul National University

ABSTRACT

동기 정류 컨버터는 다이오드에서 발생하는 도통손실을 줄이기 위해 정류 다이오드 대신 MOSFET으로 대체한 것으로 고전류 응용에서 효율을 높이기 위해 주로 사용된다. 하지만 낮은 부하에서 동기 모드 보다는 DCM으로 동작하는 것이 효율 향상에 유리하다. 일반적으로 이와 같은 모드 변환 시점을 알기 위해서는 전류의 센싱이 요구된다. 본 논문에서는 전류의 센싱없이 P&O 방식을 통해 모드 변환 시점을 확인하는 방법을 제안한다. 제안한 방법은 자세한 분석과 함께 TI사의 TMS320F28335를 통해 구현하였으며 실험을 통해 타당성 및 효율성을 검증하였다.

1. 서론

동기 정류 컨버터는 대전류 응용에서 도통손실 저감을 위해 주로 사용된다. 이는 정류를 위해 다이오드를 사용하는 대신 MOSFET을 사용함으로써 효율을 향상시킬 수 있다는 장점을 가진다. 하지만 부하 조건에 따라 최적 동작을 위해서는 게이팅 동작이 달라질 필요가 있다. 큰 부하에서는 동기 정류 스위치가 효율 향상에 도움이 되지만 부하가 낮아질 경우 동기 정류는 게이팅 손실 및 순환 전류의 증가로 효율 감소를 초래한다. 따라서 경부하 상황에서 효율을 향상시키기 위해 멀티 모드 전략이 요구된다 [1]. 이는 상황에 따른 최적 제어 전략은 디지털 제어가 가지는 장점으로 디지털 회로에 의해 쉽게 구현될 수 있다.

멀티 모드 전략은 보통의 경우 CCM으로 동작하지만 부하가 낮아지고 인덕터의 전류가 영 이하로 감소하거나 CCM에 비해 높은 효율을 제공할 수 있을 때 DCM으로 모드를 가변하는 것이다. 하지만 동기 정류 컨버터는 전류를 양방향으로 도통시킬 수 있기 때문에 일반적으로 항상 CCM으로 동작한다. 따라서 DCM으로 모드 변환 명령을 내리기 위해서는 어떠한 제어 신호를 필요로 하며 이러한 제어신호는 일반적으로 부하 전류나 인덕터 전류의 센싱에 의해 제공된다. 하지만 모드 변환을 위해 전류 센싱을 사용하는 것은 추가 회로 또는 가격의 상승을 초래하는 단점이 있다.

본 논문에서는 그림 1과 같이 DCM 모드 전환을 위해 전류 센싱을 필요로 하지 않는 새로운 디지털 제어 방법은 제안한다. 제안한 방법은 DCM 모드 제어 신호 발생을 위해 P&O 방식과 기존의 제어 신호 또는 시비율을 사용한다. 이는 추가적인 회로 없이 디지털로 쉽게 구현된다는 장점을 지닌다. 제안한 알고리즘은 동작원리의 분석과 함께 시뮬레이션과 100W 하드웨어 실험을 통해 타당성을 검증한다.

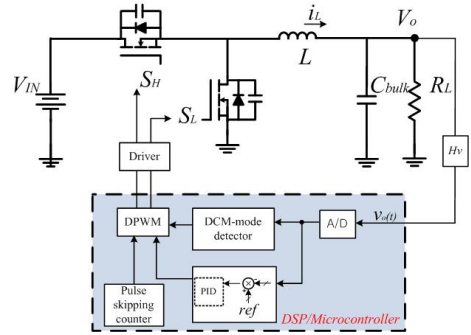


그림 1 제안한 제어 방법을 포함한 동기 정류 buck 컨버터
Fig. 1 Synchronous buck converter with a proposed controller

2. 디지털 센서리스 모드 변환 방법

2.1 센서리스 모드 변환 신호 발생 원리

동기 buck 컨버터는 전류를 양방향으로 도통시킬 수 있기 때문에 일반적으로 항상 CCM으로 동작한다. 하지만 부하가 매우 작을 경우 DCM으로 동작시키는 것이 유리하며 이는 인덕터의 전류가 영 이하로 감소할 수 있을 경우 가능해진다. 따라서 이러한 조건이 만족되면 DCM으로 전환하기 위해 동기 정류 스위치의 게이팅이 이루어지지 않고 다이오드를 통해서 흐르거나 혹은 양의 전류에만 스위치로 도통하도록 게이팅 동작을 해주어야 한다. 이와 같이 경부하에서 DCM으로 동작할 경우 게이팅 손실이나 순환전류로 인한 손실을 줄일 수 있어 효율 향상에 도움이 된다.

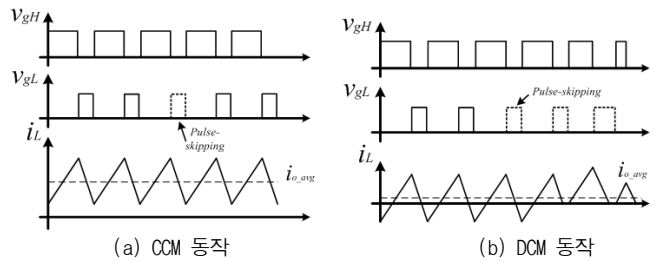


그림 2 제안한 방법의 전압 전류 파형
Fig. 2 Voltage and current waveforms of the proposed method

경부하 또는 DCM 조건을 판별하기 위해서는 일반적으로 전류의 센싱을 필요로 하는 문제점이 있다. 전류 센싱을 하더라도 전압 변동이 생길 경우 또는 멀티 모듈에서 잘못된 DCM 판별을 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 전류 센싱을 필요로 하지 않고 DCM 동작으로 모드 변환을 할 수 있는 방법을 제안한다. 제안한 방법은 그림 2와 같이 일정 주기마다 low side의 게이팅 신호를 인가하지 않음으로써 제어 신호의 변화를 관찰을 통해 DCM 조건을 판별하고 모드 전환을 시도한다.

이러한 방법은 그림 2(a) 처럼 컨버터가 현재 CCM으로 동작하고 있을 경우 제어 신호에 큰 영향을 미치지 않는다. 이는 일반적인 다이오드 정류 컨버터와 동일한 원리로 동작하기 때문이다. 반면 그림 2(b)와 같이 컨버터가 DCM으로 동작하고 있을 경우 제어 신호에 영향을 미치게 되며 이를 판별하여 모드 전환을 시도한다. 모드 전환을 하게 되면 CCM 동작 때와는 달리 low side의 게이팅 신호는 인가되지 않는다. DCM에서 CCM으로의 모드 전환 기준은 일정 제어 신호 이상을 기준으로 잡으면 되기 때문에 더욱 쉽게 모드 전환을 이룰 수 있다. 이에 대한 개념적인 설명은 그림 3과 같으며 정상상태인 경우를 가정하였다.

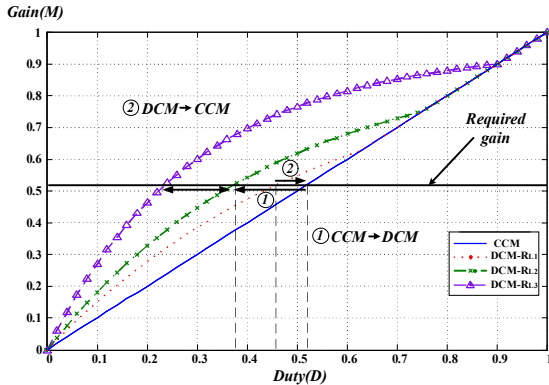


그림 3 모드에 따른 전압 이득

Fig. 3 DC voltage gain according to CCM and DCM operation

CCM으로 동작할 경우 부하에 상관없이 전압 이득은 시비율에 비례한다. 따라서 입력 전압이 일정할 경우 시비율은 일정하다. 반면 DCM으로 동작하게 되면 전압 이득은 시비율 뿐 아니라 부하에 영향을 받게 된다. 따라서 경부하에서 CCM으로 동작하다 DCM으로 모드 전환이 일어날 경우 일정한 전압 이득을 얻기 위해 제어 신호 및 시비율이 바뀌어야 한다. 따라서 이러한 변화를 관찰하여 DCM 모드의 판별 및 모드 진입을 시도할 수 있다. DCM으로 동작하고 있는 경우에는 부하에 따라서 시비율이 계속 변하게 된다.

안정적인 동작을 위해 모드 변환 시 히스테리시스 영역을 둘 수 있으며 부하가 증가하여 DCM에서 다시 CCM모드로 동작시킬 경우 일정한 시비율 기준으로 그 이상일 경우 CCM으로 모드 전환을 시도할 수 있다. 부하가 커져 경계모드에 가까워 질 경우 CCM과 DCM 동작에서의 시비율의 차이는 줄어들기 때문에 쉽게 모드 전환이 가능하다.

2.2 설계 시 고려사항

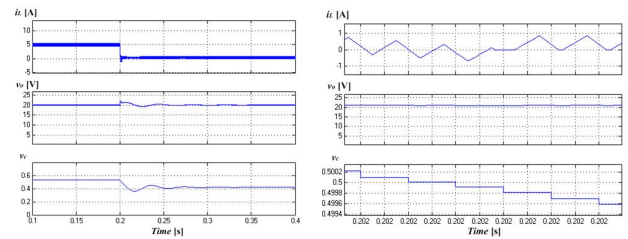
제안한 방법은 P&O 방식을 이용한 것으로 일정주기마다 SR 스위치의 pulse skip이 요구된다. 따라서 이러한 주기를 고려하여 중부하에서 효율의 감소가 없도록 고려하여야 한다. 신호 검출은 제어 신호, 시비율 혹은 각 P, I, D 등의 제어신호를 활용할 수 있으며 제어기 게인에 의해 검출 threshold 레벨이 고려되어야 한다. 끝으로 경계구간에서 오실레이션 방지와 같은 안정적인 동작을 위해 히스테리시스 영역을 둘 수 있으며 이는 카운터를 이용하여 제공할 수도 있다.

3. 실험 결과

3.1 시뮬레이션 결과

제안한 방법을 검증하기 위해 Matlab으로 모의실험을 시도하였다. 모의 실험을 위해 100W(20V/5A) 동기 벽 컨버터를

설계하였으며 100kHz 고정 주파수에서 동작하도록 하였다.

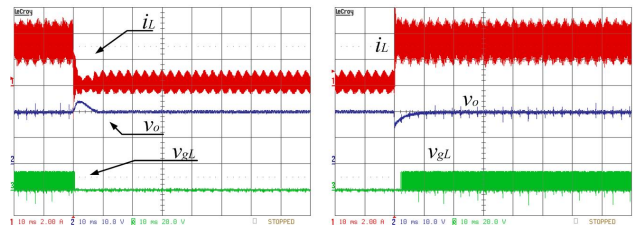


(a) 전류(i_L), 전압(V_o , V_c) 파형 (b) 전압, 전류 확대 파형
그림 4 시뮬레이션 결과 파형 (5A 에서 0.2A 부하 변동)

Fig. 4 Simulation result of the proposed method

그림 4는 시뮬레이션 결과를 도시한 것으로 부하전류가 5A에서 0.2A로 감소할 경우 CCM 동작을 하다가 SR 스위치의 pulse skip 신호에 의해 DCM 동작신호를 인지하여 DCM 모드로 변환하는 과정을 보여준다. 그림 5는 제안한 방법을 하드웨어 프로토타입 제작을 통해 검증한 결과이다. 시뮬레이션과 마찬가지로 전류센서없이 DCM 모드 전환이 잘 이루어짐을 확인할 수 있다.

제안한 방법의 하드웨어 검증을 위해 프로토타입을 제작하였으며 TI사의 TMS320F28335 DSP를 이용하여 제어단을 구성하였다. 그림 5는 하드웨어 실험 결과를 나타내며 중부하에서 경부하로 경부하에서 중부하로 변환 시 제안한 방법을 통해 모드 변환이 잘 일어나는지 확인하였다. 그림 5(a)는 부하가 감소한 경우를 보여주며 인덕터 전류는 잠시 CCM을 유지하다 DCM으로 모드 전환하는 것을 확인할 수 있다. 또한 SR 스위치의 게이팅 역시 오프됨을 알 수 있다. 그림 5(b)는 부하가 증가한 경우를 나타내며 CCM으로 동작하고 있는 동안 SR 스위치의 게이팅 동작이 이루어져 동기 정류가 이루어 짐을 알 수 있다. 따라서 시뮬레이션과 하드웨어 실험을 통해 제안한 센서리스 모드 변환 제어 방법의 타당성을 검증할 수 있었다.



(a) $I_o = 4A \rightarrow 0.2A$ (b) $I_o = 0.2A \rightarrow 4A$

그림 5 하드웨어 실험 결과 파형

Fig. 5 Experimental result of the proposed method

4. 결론

본 논문에서는 동기 정류형 벽 컨버터의 센서리스 CCM/DCM 모드 변환 방법을 제안하였다. 넓은 부하 범위에서 효율을 높이기 위해 CCM/DCM 모드 전환이 필요한데 이 때 부하 조건을 판별하기 위해 전류의 센싱을 필요로 한다. 제안한 방법은 전류 센싱없이 일정주기 마다 pulse skipping을 통해 제어 신호를 관찰함으로써 DCM 조건을 판별하는 것으로 효율의 감소나 추가적인 소자의 요구 없이 쉽게 구현될 수 있다는 장점을 가진다. 제안한 방법은 간단한 동작원리의 분석과 함께 실험을 통해 그 효율성과 타당성을 검증하였다.

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No.20104010100490)

참고 문헌

- [1] A. V. Peterchev and S. R. Sanders, "Digital multimode Buck Converter Control With Loss-Minimizing Synchronous Rectifier Adaptation," *IEEE Power Electron.*, vol. 21, no. 6, pp.1588-1599, Nov. 2006.