

넓은 부하 범위를 위한 동기 컨버터의 디지털 제어

백종복, 최우인, 조보형
서울대학교 전기. 컴퓨터공학부

Digital Control of Synchronous Converter for wide load range

Jongbok Baek, Woo-In Choi and Bohyung Cho

School of Electrical Engineering and Computer Science Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 동기정류형 벽 컨버터의 넓은 부하 범위에서 고효율을 달성하기 위한 디지털 제어 전략을 제안한다. 동기 정류 컨버터는 다이오드에서 발생하는 도통손실을 줄이고자 하는 방법으로 고전류 응용범위에서 유리하다. 하지만 낮은 부하에서 이러한 방법은 비효율적일 수 있다. 따라서 디지털 제어의 장점을 이용하여 넓은 부하 조건에서 높은 효율을 이루기 위해 모드 변환 전략을 제시한다. 제어 방법은 3단계로 이루어져 있으며 부하가 줄어들어 따라 CCM 모드에서 DCM 모드 그리고 pulse skipping 모드로 전환한다. 제안한 방법은 TI사의 TMS320F28335를 통해 구현되었으며 실험을 통해 타당성 및 효율성을 검증하였다.

1. 서론

전자 제품의 사용이 점점 늘어나면서 이와 관련된 전력 변환기술의 성능 향상에 대한 요구도 더욱 커지고 있다. 특히 높은 효율이나 전력 밀도는 전력전자 기술의 발전과 함께 끊임없이 이슈가 되고 있으며 이와 관련된 연구도 활발히 진행 중이다. 그 중 동기 벽 컨버터는 고 전류 응용범위에서 주로 사용되는 토폴로지로서 정류 다이오드를 능동 스위치로 대체함으로써 도통 손실을 줄여 효율의 향상을 이룬다. 이와 같은 동기 벽 컨버터의 각 스위치는 일정한 데드타임을 두고 교번으로 동작한다. 따라서 전류는 음의 방향으로 흐를 수 있으며 항상 CCM 조건으로 동작하게 된다. 이러한 동작은 부하가 낮아질 경우 전류가 음의 방향으로 흐르기 때문에 영전압 스위칭이 가능하게 해주는 장점을 가진다. 하지만 부하가 더욱 낮아질 경우 순환전류의 증가로 손실이 증가하게 될 수 있다. 따라서 넓은 범위에서 고효율을 얻기 위해서는 항상 고정주파수의 CCM으로 동작하기보다 조건에 따라 다르게 동작하는 것이 유리할 수 있다 [1].

본 논문에서는 넓은 부하영역에서 고효율을 위한 동기 벽컨버터의 디지털 제어 방법을 제안한다. 디지털 제어는 일반적으로 아날로그 제어에 비해 구현이 쉽고 스마트 제어의 적용이 가능하며 부피와 가격을 줄일 수 있다는 장점을 가진다. 이와 같은 장점을 이용하여 구현과 동작이 간단한 멀티모드 제어 전략을 제안한다. 중부하의 경우 컨버터는 도통손실 감소를 위해 CCM으로 동작한다. 부하가 줄어들 경우 SR 스위치의 게이팅을 오프 함으로써 DCM으로 동작하도록 한다. 이를 통해 게이팅 손실과 순환전류로 인한 손실을 줄인다. 부하가 더욱 줄어들 경우 pulse skipping 모드로 동작한다. 부하가 아주 작아질 경우 스위칭으로 인한 손실이 손실의 대부분을 차지하기 때문에 이러한 스위칭을 줄임으로써 효율 향상을 이룬다.

각 모드에 따른 디지털 제어의 평균 전류 센싱 방법에 대한

분석을 바탕으로 TI사의 TMS320F28335를 이용하여 제어를 구현한다. 또한 안정적인 동작을 위해 부하에 따른 히스테리시스 영역을 두었으며 각 모드의 변환 기준은 효율 측정 실험을 통해 정하였다. 이는 다상 컨버터에 적용이 가능하며 상의 수와 부하에 따라 다양한 모드가 존재할 수 있다.

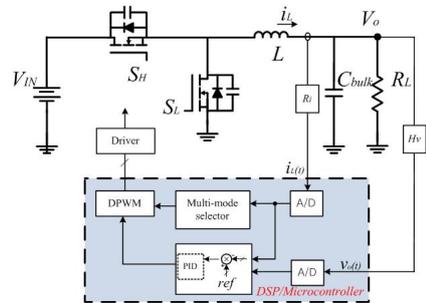
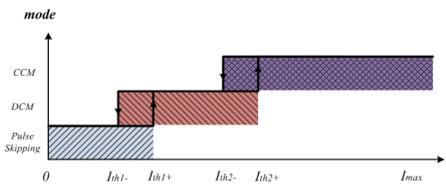


그림 1 동기 벽 컨버터 구성도

Fig. 1 Configuration of the Synchronous Buck converter

2. 디지털 다중 모드 제어

넓은 부하영역에서 고효율 달성을 위해 벽 컨버터는 부하에 따라 3가지 모드로 동작할 수 있다. 제안한 방법은 그림 1과 같이 구성하였으며 그림 2에서처럼 부하가 감소함에 따라 CCM, DCM, 그리고 pulse skipping 모드로 변환하도록 제어하였다. 모드 변환 기준은 부하에 따라 달라지며 부하의 측정은 다양한 방법으로 얻을 수 있으며 본 논문에서는 인덕터 전류의 센싱을 통해 예측하는 방법을 분석해 본다.



(a) 동기 컨버터 구조 (b) 영전압 스위칭 조건

그림 2 디지털 모드 변환 전략

Fig. 2 Strategy of a digital mode change

2.1 CCM 동기 정류 모드

중부하에서 컨버터는 그림 3에 보이는 것과 같이 고정주파수의 CCM 모드로 동작한다. 이 때 입출력 전압 이득은 턴 온 시간에 비례한다. 동기 정류를 스위치 S_L 은 S_H 가 턴오프 된 후 일정 데드타임을 지난 후 턴 온 된다. 따라서 이 때 인덕터의 전류는 다이오드를 통과하는 것이 아니라 MOSFET의 채널을 통해 도통하게 된다. 출력 전류는 인덕터의 평균 전류와 같으며 따라서 평균 전류 측정을 위해 인덕터 전류를 센싱한다. 전류

센싱을 위해 predictive digital 전류 제어 방법을 이용할 수 있으며 턴 온 시간의 중간지점에서 전류를 샘플링함으로써 평균 전류를 얻을 수 있다. 이와 같은 방법으로 노이즈 문제와 많은 전류 샘플링을 줄일 수 있다는 장점을 얻을 수 있다.

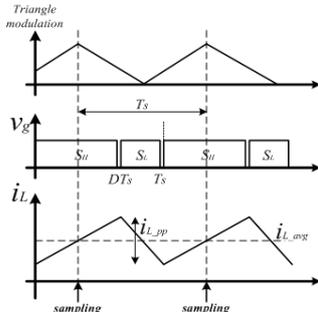


그림 3 CCM 동작 파형

Fig. 3 Waveforms of CCM operation

2.2 DCM 모드

부하가 낮아질 경우 인덕터 전류가 음으로 흐르지 않도록 그림 4와 같이 동기 정류 스위치 S_L 의 게이팅을 인가하지 않는다. 따라서 컨버터는 DCM 모드로 동작하게 된다. 이 모드로 동작할 경우 순환전류로 인한 손실 감소와 동기정류 스위치의 게이팅을 위한 구동 손실을 줄일 수 있다. DCM 모드로 동작할 경우 시비율은 부하에 의존하게 되며 이는 일반적인 벽컨버터의 DCM 모드와 동일하다. 따라서 DCM 으로 동작시키기 위한 최대 부하조건은 아래와 같다.

$$I_o < \frac{V_{IN} T_s M (1-M)}{2L} \quad (1)$$

DCM에서도 전류 센싱을 위해 앞의 방법을 사용한다. 단 센싱한 전류가 평균전류와 다르기 때문에 계산을 통해 평균전류를 예측한다. D_1 시간은 식(2)와 같이 유도할 수 있으며 따라서 평균 전류는 식(3)과 같이 예측할 수 있다.

$$D = \sqrt{\frac{2LI_o M}{V_{IN} T_s (1-M)}}, \quad D_1 = \frac{(V_{IN} - V_o)}{V_o} D \quad (2)$$

$$I_{avg} = i_{sense}(D + D_1) \quad (3)$$

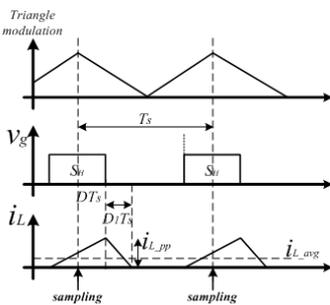


그림 4 DCM 동작 파형

Fig. 4 Waveforms of DCM operation

2.3 Pulse skipping 모드

부하가 더욱 낮아지면 컨버터의 손실원은 게이트 구동과 스위칭 손실이 주가 된다. 이러한 손실은 스위칭 주파수에 비례한다. 따라서 부하가 아주 낮은 경우 스위칭 동작을 줄이는 것을 통해 유효 스위칭 주파수를 가변하는 것이 매우 효과적이다. 동작은 그림 5와 같으며 이 때 시비율은 D_{min} 에 의해 제한되며 pulse skipping에 의해 효과적으로 주파수를 가변할 수 있도록 한다. 부하 예측은 DCM 방식과 유사하게 할 수 있

며 식은 아래와 같다.

$$I_{avg} = i_{sense}(D + D_1) \frac{n_{on}}{n_{on} + n_{off}} \quad (4)$$

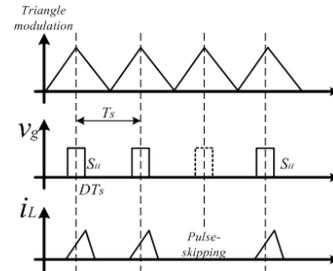


그림 5 Pulse skipping 모드 동작 파형

Fig. 5 Waveforms of Pulse skipping mode operation

3. 실험 결과

제안한 방법을 검증하기 위해 입력 전압 38V, 출력 20V/5A, 100kHz 스위칭 동작의 동기 벽 컨버터 프로토타입 회로를 제작 및 실험하였다. 알고리즘 구현 및 제어를 위해 TI사의 TMS320F28335를 사용하였으며 효율 측정을 통해 모드 변환 기준을 설정하였다. 효율은 Yokogawa WT210 2개를 사용해 입력 전력을 측정하였으며 아래 그림 6에 도시하였다. 실험을 통해 모드 변환시 넓은 범위에서 고효율을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 구동전력을 포함하지 않았기 때문에 경부하에서는 다소 높은 효율로 측정되었으며 pulse skipping 모드는 부하가 커질 경우 출력 전압 리플이 커지기 때문에 동작범위가 제한된다.

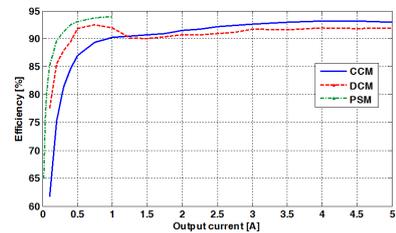


그림 6 각 모드별 측정 효율

Fig. 6 Measured efficiency curve for CCM, DCM, PSM

4. 결론

동기정류형 벽 컨버터의 넓은 부하 범위에서 고효율을 달성하기 위한 디지털 제어 전략을 제안하였다. 동기 정류형 컨버터가 도통 손실을 줄이는데 효과적이지만 항상 그렇지는 않다. 부하 조건에 따라 효율적으로 동작되는 제어 모드는 다를 수 있다. 경부하 효율을 향상시키기 위해 DCM 모드와 pulse skipping 모드를 추가하였다. 잦은 모드 변환을 줄이기 위해 부하의 히스테리시스 영역을 두었으며 모드 변환 딜레이를 주어 안정적으로 동작하도록 하였다. 각 모드의 변환 기준은 효율 측정 실험을 통해 정하였다. 또한 각 모드에 따른 디지털 제어의 평균전류 센싱 방법에 대해 분석하였으며 이를 적용한 하드웨어 실험을 통해 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.