

임계 도통 모드 부스트 PFC 컨버터의 영전압 스위칭 디지털 제어 기법

문정필, 김종우, 문건우
한국과학기술원 전기 및 전자 공학과

The Digital Control for Zero Voltage Switching of CRITICAL Mode Boost PFC Converter

Jung-Pil Moon, Jong-Woo Kim and Gun-Woo Moon

Department of Electrical Engineering KAIST, 291 Daehangro, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea

ABSTRACT

본 논문에서는 동기 정류 스위치를 사용한 임계 도통 모드 부스트 PFC 컨버터의 디지털 제어 기법을 제안한다. 상태 궤적 분석을 통해 입력전압 전 범위의 영전압 스위칭 조건을 구하였으며, 총 입력 전하 분석을 통하여 높은 역률을 위한 스위치 추가 온-타임을 도출하였다.

제안하는 제어 기법은 디지털 제어기를 이용한 230V_{rms} 입력, 400V/200W 출력 프로토타입에서 타당성을 입증하였다. 그 결과 동기 정류기를 이용한 임계 도통 모드 부스트 PFC 컨버터는 높은 역률 및 효율을 갖는다.

1. 서론

다양한 어플리케이션에서 널리 사용되는 AC/DC 컨버터의 경우 역률 및 고조파 규제를 만족시키기 위해 PFC 컨버터를 이용한 2단 형태의 컨버터가 주로 사용된다. 이때, 2단 형태 컨버터의 전체 효율은 각 단의 효율의 곱으로 계산할 수 있다. 따라서 2단 형태 컨버터의 전체 효율을 향상시키기 위해서는 PFC 컨버터의 효율 향상이 요구된다.

PFC 컨버터의 경우 입력 전류가 연속이며 회로의 구조가 간단한 부스트 컨버터가 널리 사용되고 있다. 특히 임계 도통 모드 부스트 PFC 컨버터의 경우 인덕터 전류의 영전류 지점에서의 스위치 턴-온 지연 제어를 통해 영전압 스위칭 또는 빨리 스위칭이 가능하기 때문에, 스위칭 손실이 작다는 장점이 있다. 그러나 높은 입력전압에서는 여전히 큰 스위칭 손실을 가지고 있다^[1].

따라서 본 논문에서는 그림 1과 같은 동기 정류 스위치를 이용한 임계 도통 모드 부스트 PFC 컨버터의 입력전압 전 범위에서의 영전압 스위칭 제어 기법과 역률 보상 방법에 대해 제안하고자 한다.

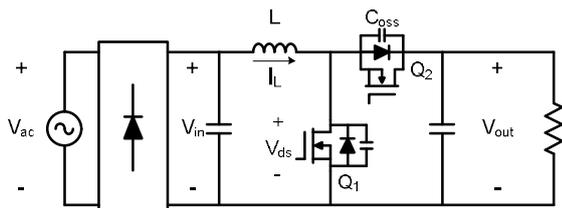


그림 1. 동기 정류 스위치를 이용한 임계 도통 모드 부스트 PFC 컨버터

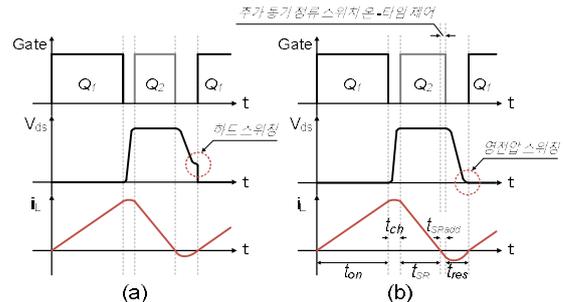


그림 2. 임계 도통 모드 부스트 PFC 컨버터의 동작 파형
(a) 기존 방식, (b) 제안된 방식

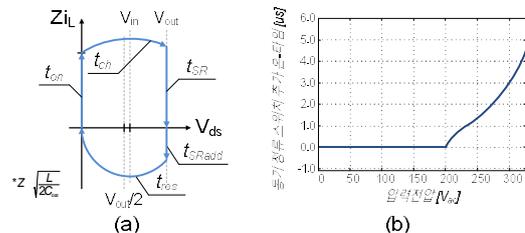


그림 3. (a) 동기 정류 스위치 추가 온-타임이 적용된 상태 궤적
(b) 입력전압에 따른 동기 정류 스위치 추가 온-타임

2. 제안하는 제어 기법

2.1 영전압 스위칭 조건

임계 도통 모드 부스트 PFC 컨버터는 인덕터 전류가 영으로 감소한 이후, 인덕터와 기생 캐패시터 간의 공진에 의한 빨리 스위칭 기법을 통해 스위칭 손실을 줄일 수 있다. 그러나 입력전압이 출력전압의 절반보다 커지는 경우 그림 2. (a)와 같이 영전압 스위칭이 불가능하다.

그러나 동기 정류 스위치를 사용하면 다이오드와 달리, 온-타입 제어를 통해 인덕터 전류가 영으로 감소한 이후에도 도통이 가능하다. 이 음의 값의 인덕터 전류는 부족한 영전압 스위칭 에너지에 추가적인 에너지를 제공하며 그림 2. (b)와 같이 완전한 영전압 스위칭이 가능하도록 한다. 또한 동기 정류 스위치의 사용으로 도통 손실 역시 줄일 수 있으므로 효율 향상이 가능하다.

2.2 동기 정류 스위치 추가 온-타입

상태 궤적 분석을 통해 입력전압의 전 범위에서 영전압 스위칭이 가능한 동기 정류 스위치 추가 온-타임을 구한다. 그림 3. (a)는 동기 정류 스위치를 사용하여 영전압 스위칭이

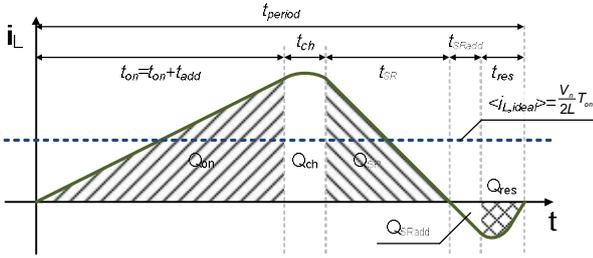


그림 4. 제안하는 제어 기법이 적용된 동기 정류 스위치를 이용한 임계 도통 모드 부스트 PFC 컨버터의 동작 별 입력 전하

가능한 추가 온-타임을 적용했을 때의 상태 궤적이다. 이때, 동기 정류 스위치의 추가 온-타임을 인덕터 전류식과 피타고라스의 정리에 의해 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$t_{SR,add} = \begin{cases} \sqrt{LC \left(\frac{V_n}{V_{out} - V_n} \right)^2 - LC}, & (V_n > V_{out}/2) \\ 0, & (V_n \leq V_{out}/2). \end{cases} \quad (1)$$

그림 3. (b)는 입력전압의 크기에 대하여 요구되는 동기 정류 스위치 추가 온-타임을 그래프로 나타낸 것이다.

2.3 역률 보상을 위한 스위치 추가 온-타임

이상적인 임계 도통 모드 부스트 PFC 컨버터는 인덕터 전류가 영으로 감소되면 곧바로 스위치가 턴-온 되고, 이때 평균 인덕터 전류는 다음과 같다.

$$\langle i_{L,ideal} \rangle = \frac{V_n}{2L} t_{on}. \quad (2)$$

동기 정류 스위치를 이용한 임계 도통 모드 부스트 PFC 컨버터에 제안하는 제어를 적용하는 경우 기존 방식 대비, 역률이 악화된다. 이는 역방향 전류의 증가와 스위칭 주기의 증가로 인하여 발생하게 되며, 이것을 보상하기 위해서는 스위치의 추가 온-타임 제어가 요구된다.

이때 요구되는 스위치의 추가 온-타임을 총 입력 전하 분석을 통해 구할 수 있다. 역률 보상을 위한 스위치 추가 온-타임을 적용되었을 때, 총 입력 전하에 의한 인덕터 전류의 평균값이 (2)와 같도록 해야 한다.

그림 4는 동기 정류 스위치를 이용한 임계 도통 모드 부스트 PFC 컨버터의 입력 전하를 동작 별로 나타낸 것이다. 이때 스위칭 한 주기 동안의 총 입력 전하는 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 따라서 역률 보상을 위한 스위치 추가 온-타임을 적용된 경우, 총 입력 전하에 의한 평균 인덕터 전류는 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 따라서 식을 정리하면 (5)와 같은 동기 정류 스위치의 추가 온-타임으로 인하여 발생하는 역률 악화현상을 보상하기 위해 요구되는 스위치 추가 온-타임을 식을 도출 할 수 있다.

$$Q_{net} = Q_{on} + Q_{ch} + Q_{SR} - Q_{SR,add} - Q_{res}, \quad (3)$$

$$\frac{Q_{net}}{t_{period}} \Big|_{t_{on}=t_{on}+t_{add}} = \frac{V_n}{2L} t_{on}, \quad (4)$$

$$t_{add} = \sqrt{\left(1 - \frac{V_n}{V_{out}}\right) t_{on} t_{per} - t_{on}}. \quad (5)$$

3. 실험 결과

제안된 영전압 스위칭 제어 기법의 타당성을 증명하기 위

해 230V_{rms} 입력 400V/200W 출력의 프로토타입으로 실험을

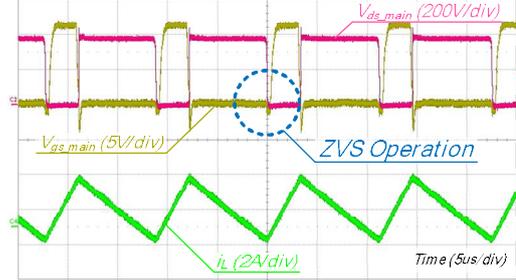


그림 5. 영전압 스위칭 동작 파형 (230V_{rms} 입력, 100% Load조건)

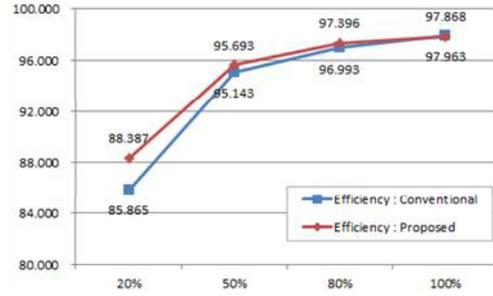


그림 6. 부하 별 효율 비교 (230V_{rms} 입력)

하였다. 그림 5는 입력전압 최대치(325V)에서 영전압 스위칭 파형이다. 동기 정류 스위치의 추가 온-타임 제어를 통해 입력전압 전 범위에서 영전압 스위칭이 가능하다.

그림 6은 230V_{rms} 입력에서 부하 별 효율을 측정하여 그 결과를 기존의 제어 방식과 비교한 것이다. 제안된 제어 방식은 스위칭 손실과 도통 손실을 동시에 줄이기 때문에 기존 대비 최대 약 2.5%의 높은 효율을 보인다. 또한 역률 보상을 위한 스위치 추가 온-타임을 적용하여 기존의 제어 방식과 동등 수준의 높은 역률을 가짐을 확인하였다. 따라서 제안하는 제어 방식을 통해 높은 역률을 유지하면서 효율을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 동기 정류 스위치의 추가 온-타임을 통해 입력전압 전 범위에서 영전류 스위칭이 가능한 임계 도통 모드 부스트 PFC 컨버터의 디지털 제어 기법에 대해 제안하였다. 상태 궤적 분석을 통해 입력전압 전 범위에서 영전압 스위칭에 요구되는 동기 정류 스위치 추가 온-타임을 도출하였으며, 총 입력 전하 분석을 통하여 역률을 보상하기 위한 추가 스위치 온-타임을 구하였다.

실험을 통해 입력전압 전 범위에서 높은 역률을 유지함과 동시에 입력전압 전 범위에서의 영전압 스위칭을 확인하였고, 그 결과 효율이 향상되었다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2010-0028680).

참고 문헌

- [1] Mohammad Marvi, "A Fully ZVS Critical Conduction Mode Boost PFC", IEEE TRANSACTIONS ON POWER