

고효율 구현을 위한 예측제어 기반 부분 스위칭 PFC 컨버터

최영준, 김태진, 김래영†
한양대학교

Predictive control based partial switching PFC converter for achieving high efficiency

Yeong Jun Choi, Tae Jin Kim, Rae Young Kim†
Hanyang University

ABSTRACT

In this paper the partial switching PFC converter which is based on predictive control is proposed. In terms of satisfying the harmonic standard, the predictive control shows a similar performance to the conventional average current mode control PFC in the normal input condition. Moreover, the current harmonic characteristic is insensitive to the distorted input voltage. With predictive control method, novel on line partial switching strategy is suggested in this paper. Depending on the operating condition, the partial switching PFC converter can boost its output voltage. Also when its efficiency needs to be improved, according to load condition, the partial switching can be achieved. The proposed strategy is proved by the results of FFT and the loss analysis using PSIM 9.0.

1. 서론

최근 산업계에서는 강화된 전류 고조파규격을 만족시키며 더불어 고효율 달성이 가능한 저비용의 PFC를 필요로 하고 있다. 하지만 주로 전 조정기(pre regulator)로 동작하는 PFC 부의 전류 고조파특성을 향상시키기 위해 정밀 동작을 위한 복잡한 알고리즘을 도입 하거나, 효율 향상을 위해 보조회로를 추가하기에는 비용 및 공간상에 제한이 있다. 따라서 전 조정기로서 저가형 MCU로 구동이 가능한 간단한 알고리즘을 가진 고효율 PFC기법에 대한 수요가 증가하고 있다. 본 논문에서는 대표적인 PFC 기법인 평균전류모드 제어 PFC와 저가형 자기제어(self control) PFC 및 두 가지의 장점을 모두 포함한 예측제어 PFC를 비교하고, 예측제어 적용과 더불어 고조파 규격을 만족시키면서 효율을 개선할 수 있는 부분스위칭 기법을 제안하였다.

2. 본론

2.1 제어방식에 따른 PFC 분류

2.1.1 평균전류모드 제어 PFC

그림 1에 나타난 평균전류모드 제어는 매 스위칭 주기마다 검출된 인덕터 전류값과 전류 지령치 비교를 통하여 스위치의 시비율을 결정한다. 이 방식은 스위칭 한 주기 동안 전류와

전압을 검출 후 오차 계산 및 보상기 연산을 통한 시비율 계산을 마쳐야하기 때문에, 디지털 구현시 스위칭 주파수에 제한이 생긴다. 이러한 단점을 해결하기 위해서 고가의 고성능 신호처리장치를 사용하거나 아날로그 IC를 사용할 경우 이 문제를 해결 할 수 있으나, 전 조정기로서의 PFC 회로에 비용 부담이 증가하게 된다. 뿐만 아니라, 이 방식은 입력전압의 영전압 부근에 전류왜곡이 발생되며, 입력 전압 왜곡시 입력전류의 파형 또한 왜곡 되므로, 모든 전원조건 하에서 강건한 PFC 기법이라 할 수 없다.

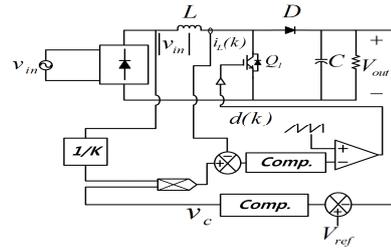


그림 1. Average current mode control PFC

2.1.2 자기제어 PFC

그림2에 나타난 자기제어 방식은 저가형 PFC구현에 적합한 기법으로써 입력전압 검출 없이, 출력전압과 인덕터 전류 검출만으로 높은 역률과 고조파 규제를 만족시킬 수 있다.^[1] 그러나 전류제어 알고리즘이 없으므로, 초기 구동 및 급격한 부하변동시 응답 속도가 느리고 전압의 오버슈트(overshoot)가 크다는 단점이 있으며, 입력전압 왜곡시 입력전류 또한 왜곡되기 때문에 안정적인 PFC 기법이라 할 수 없다.

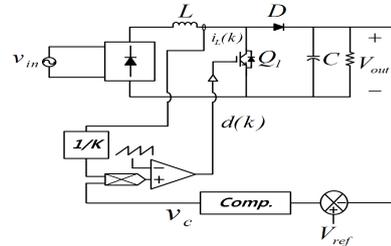


그림 2. Self control PFC

2.1.3 예측제어 PFC

그림3에 나타난 예측제어 PFC는 평균전류모드 제어 PFC 기법에 비하여 간단하게 구현할 수 있으며 전류제어 알고리즘을 가지고 있어 자기 제어 PFC 에 비하여 응답 속도 및 부하변동시 특성 또한 우수하다.^[2] 예측제어 PFC의 시비율 $d(k)$ 는 식(1)과 같이 표현될 수 있다. 여기서, V_{ref} 는 출력전압

지령치이며, $|v_{in}(k)|$ 는 정류된 순시 입력전압, T_s 는 스위칭 주기, $i_L(k)$ 는 인덕터 전류, $i_{ref}(k+1)$ 은 전압제어기 출력전압지령 v_o 에 입력전원으로부터 얻은 입력전압 주파수 정보 ω_{line} 에 대한 $|\sin(\omega_{line}t(k+1))|$ 을 곱한 값이다. 여기서 $t(k)$ 는 k 번째 스위칭 주기, $t(k+1)$ 은 미래 값인 $k+1$ 번째 스위칭 주기를 나타낸다.

$$d(k) = \frac{V_{ref} - |v_{in}(k)|}{V_{ref}} + \frac{L}{T_s V_{ref}}(i_{ref}(k+1) - i_L(k)) \quad (1)$$

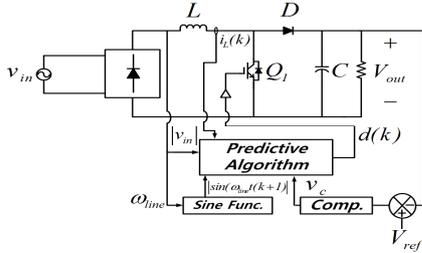


그림 3. Predictive control PFC

2.2 부분 스위칭

본 논문에서 제안한 부분스위칭은 승압 여부에 따라 입력 전압 첨두점 부근 부분스위칭과 부하량에 따라 인덕터 전류 지령의 폭을 가변 할 수 있는 영전압 부근 부분스위칭으로 나뉜다.

2.2.1 첨두점 부근 부분 스위칭

연속 전류전도모드(CCM)에서 부스트 PFC의 시비율 식은 식(2)와 같다. 여기서 $V_{in,peak}$ 는 입력전압의 첨두치, V_o 는 출력전압 그리고 ω_{line} 는 입력전압의 각주파수를 나타낸다. 출력전압이 입력전압 첨두치 보다 작아지면, 시비율이 음수가 되는 구간이 발생되어 스위칭 오프 구간이 발생한다. 하지만 인덕터 L로 인한 전류의 뒤집 현상과 입력전압 첨두치 변화시 스위치가 꺼지는 구간이 변동되므로 이 구간을 일정하게 유지하려면 스위칭 오프 구간 제어가 필요하다. 본 논문에서 제안한 스위칭 오프 구간 제어기는 각도로 환산된 스위칭 오프 구간 지령치와 검출된 스위칭 오프구간 간의 오차를 출력전압 조절을 통하여 감소시키도록 설계 하였으며, 시뮬레이션 결과 파형은 그림4와 같다.

$$d = 1 - \frac{V_{in,peak}}{V_o} \sin \omega_{line} t \quad (2)$$

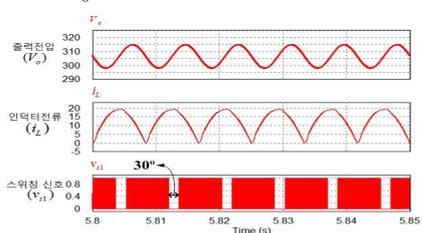


그림 4. 첨두점 부근 부분스위칭 (예측제어 부분스위칭B) 출력전압, 인덕터 전류, 스위칭 신호 시뮬레이션 파형 ($v_{in} = 220 V_{rms}$, $V_{out} = 307.8 V$, $P_o = 3kW$)

2.2.2 영전압 부근 부분 스위칭

영전압 부근 부분스위칭은 입력전압이 영전압 부근에서 스위칭 동작을 멈추는 것을 의미하며 이것은 인덕터 전류 지령의 폭을 감소 시켜 구현 가능하다. 스위치의 스위칭 오프 구간을 항상 일정하게 한다면 중부하시 고조파 규격을 만족할 수 없으므로 부하량에 따라 인덕터 전류 지령의 폭을 변화 시킬 수 있는 알고리즘을 제안 하였다. 첨두점 부근

부분스위칭과 더불어 영전압 부근 부분스위칭을 적용한 시뮬레이션 결과를 그림5에 나타내었다. 영전압 부근 부분스위칭을 통해 경부하시 효율을 개선시킬 수 있다.

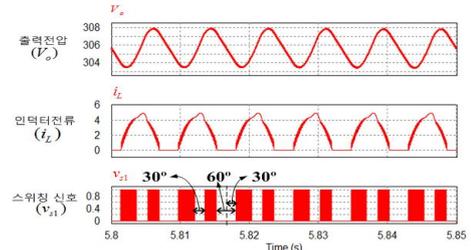


그림 5. 첨두점 및 영전압 부근 부분스위칭 적용 (예측제어 부분스위칭C) 출력전압, 인덕터 전류, 스위칭 신호 시뮬레이션 파형 ($v_{in} = 220 V_{rms}$, $V_{out} = 305.6 V$, $P_o = 600 W$)

2.3 손실 및 고조파 분석

PSIM 9.0을 이용하여 제안된 방법 적용시 스위치와 부스트 다이오드 손실 및 고조파를 분석하였다. IGBT는 IXYS사의 IXGR48N60C3D1, 부스트 다이오드는 FAIRCHILD사의 ISL9R3060G2를 적용하였다. 기존 예측제어 대비 예측제어 부분스위칭 적용시 개선된 손실 저감률은 그림6을 통하여 확인할 수 있다. 고조파 분석은 그림 7과 같으며, EN 61000 3 2 CLASS A의 모든 차수 고조파 규격을 만족함을 확인할 수 있다.



그림 6. 제어방식별 스위치, 다이오드 손실 비교

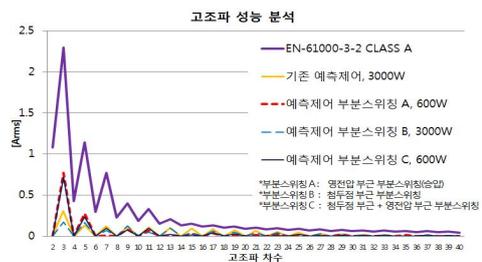


그림 7. 부분스위칭 PFC 적용 고조파 분석 결과

3. 결론

본 논문에서는 예측제어 PFC를 기반으로 한 고효율 부분스위칭 기법을 제안하였다. 제안된 방식은 승압의 여부에 따라 첨두점 부근 부분스위칭과 부하량에 따라 영전압 부근 부분스위칭으로 나뉘며, 제안된 방법을 적용하여 효율을 개선시킬 수 있으며, 고조파 규제 또한 만족시킬 수 있다.

참고 문헌

- [1] D. Borgonovo, J. Remor, I. Barbi, and A. Perin, "A self controlled power factor correction single phase boost pre regulator," in Proc. of PESC, pp. 2351-2357, June 2005.
- [2] W. Zhang, G. Feng, Y. F. Liu, and B. Wu, "A digital power factor correction (PFC) control strategy optimized for DSP," IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 6, pp. 1474-1485, Nov. 2004.