

PFC 부스트 컨버터의 역할 및 고조파 왜율 개선을 위한 이득 조정 기법

김형석, 성현욱, 이재범, 문건우, 윤명중
 카이스트 전기 및 전자 공학과

Gain Scheduling of PFC Boost Converter for Improving PF and THD

Hyoung-Suk Kim, Hyun-Wook Seong, Jae-Bum Lee, Gun-Woo Moon, and Myung-Joong Youn
 Department of Electrical Engineering KAIST, 335 Gwahangno, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea

Abstract

본 논문에서는 PFC 부스트 컨버터의 역할 및 고조파 왜율 개선을 위한 전류 제어기 이득 조정 기법을 제안한다. PFC단은 입력 전압의 변화에 따라 인덕터 전류의 크기가 달라져 부스트 인덕터의 인덕턴스가 변화하게 되어 전류 루프의 주파수 특성이 변화하게 된다. 이러한 현상으로 인한 전류 루프의 이득 변화를 분석하였다. 이를 기반으로 입력 전압에 따라 전류 제어기의 이득을 조정해 줌으로써, 충분한 위상마진을 확보함과 동시에 PF와 THD 성능을 개선한다. TI사의 TMS320F28027 MCU를 이용한 실험을 통해 제안된 기법의 유용성을 검증한다.

1. 서론

최근들어 디지털 IC는 그 성능이 크게 향상되고 가격이 낮아짐에 따라, 여러 제어 기법들의 적용이 쉬우며 타 시스템으로 이식이 용이한 등의 장점들이 부각되고 있다. 이에 따라, 디지털 IC를 이용한 PFC단 디지털 제어 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

PFC단의 경우 입력 전류가 연속이며 그 구조가 간단한 부스트 컨버터가 널리 사용되고 있다. 그림 1과 같이 일반적인 PFC단 부스트 컨버터 제어기는 출력 전압을 제어하기 위한 외부 전압 루프와, 입력 전류가 입력 전압과 동일한 사인파 형태가 되게 하기 위한 내부 전류

루프의 이중루프로 구성되어 있다. 전압루프 제어기는 출력전압의 120Hz 리플 성분을 제거하기 위해 수십 Hz의 낮은 crossover 주파수를 가지도록 설계 된다. 반면, 전류루프 제어기는 입력 전류가 사인파 형태의 전류 지령을 잘 추종하도록 수 kHz의 높은 crossover 주파수를 가지도록 설계 된다.

PFC단 부스트 컨버터는 AC 입력 전압이 변화함에 따라 인덕터 전류의 크기가 달라지게 된다. 인덕터 전류의 크기가 달라지면 부스트 인덕터의 permeability가 변화하게 되어 인덕턴스 값이 변화하게 된다. 인덕턴스 값의 변화는 전류 제어루프의 주파수 특성의 변화를 초래하고 이에 따라 요구되는 전류 제어기의 이득이 달라지게 된다. 따라서, 본 논문에서는 디지털 IC를 이용해 입력 전압 변화에 따라 전류 제어기의 이득을 조정해 줌으로써 충분한 위상마진을 확보함과 동시에 PF와 THD 성능을 개선한다.

2. 제어기 이득 조정 기법

2.1 입력 전압 변화에 따른 인덕턴스 변화

하이 라인 전용 PFC단 부스트 컨버터는 180V_{rms}~264V_{rms}의 입력전압의 변화를 가진다. 동일한 부하조건에서 동작할 경우 인덕터 전류의 크기는 입력 전압이 낮아질수록 커지게 된다. 인덕터 전류의 크기가 변화하게 되면, permeability가 변화하게 되어 인덕턴스 값이 변화하게 된다. 그림 2 (a)는 본 논문에 사용 된 High Flux 코어 CH270060E의 전류 변화에 따른 permeability 변화를 나타낸다. 전류 값이 커질수록 permeability가 작아짐을 확인할 수 있다. 그림 2 (b)는 100% 부하 조건에서 입력 전압 변화에 따른 인덕턴스 변화를 측정 결과를 나타낸다.

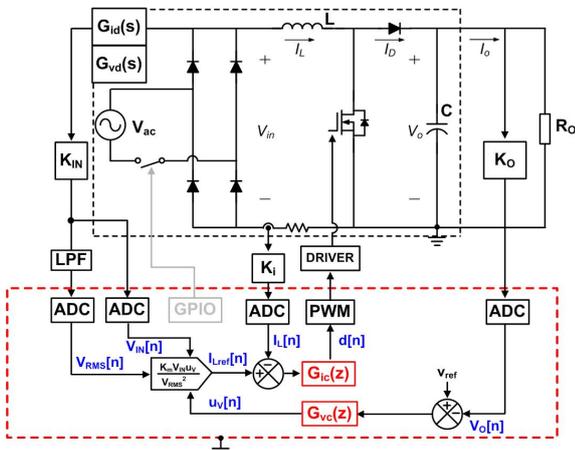


그림 1 PFC단 부스트 컨버터 제어기

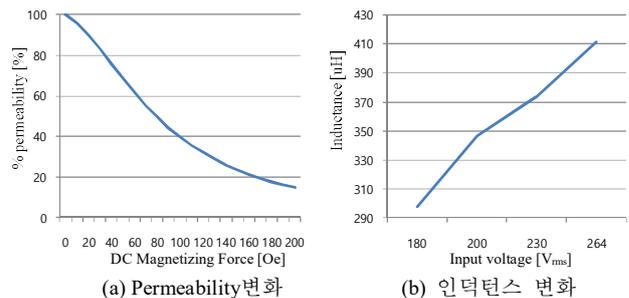


그림 2 인덕터 전류 변화에 따른 permeability 변화 및 입력 전압 변화에 따른 인덕턴스 변화

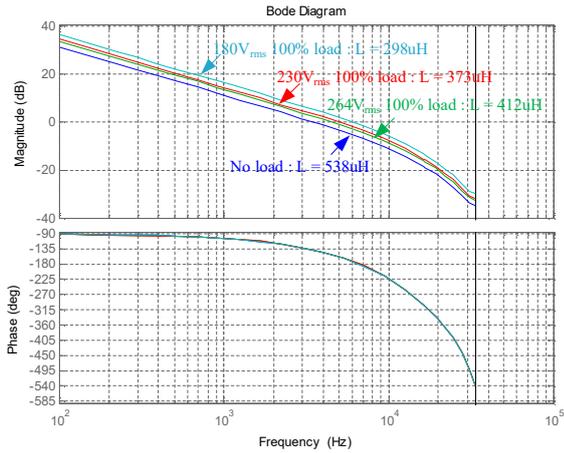


그림 3 인덕턴스 변화에 따른 전류 루프 주파수 특성 변화

입력 전압이 낮아 질수록 인덕터 전류의 값이 커져 인덕턴스 값이 작아짐을 확인 할 수 있다.

2.2 인덕턴스 변화에 따른 전류 루프 주파수 특성 변화

PFC단 부스트 컨버터의 시비율 변화에 따른 인덕터 전류 변화 $G_{id}(s)$ 와 전류 루프의 루프 이득 $T_i(s)$ 는 다음과 같은 식으로 나타내어진다 [1].

$$G_{id}(s) = \frac{\hat{i}_L}{\hat{d}} \approx \frac{V_o}{sL} \quad (1)$$

$$T_i(s) = K_i \cdot G_{id}(s) \cdot G_{ic}(s) \approx \frac{K_c \cdot V_o}{sL} \cdot G_{ic}(s) \quad (2)$$

2.1장에서 설명 하였듯이 인덕터 전류가 커질수록 인덕턴스 값은 작아지게 된다. 또한, 식 (2)에서 알 수 있듯이 인덕턴스 값이 작아 질수록 전류루프의 이득은 커지게 된다. 입력 전압이 고정된 상태에서 부하가 커지게 되면 인덕터 전류가 커지게 되므로, 인덕턴스 값이 작아지게 된다. 따라서, 위상 마진 확보를 위해서 전류 제어기는 전류 루프의 이득이 가장 큰 100% 부하 조건을 기준으로 설계 되어야 한다. 하지만, 입력 전압이 변화하게 되면, 동일한 100% 부하 조건에서 인덕터 전류의 크기는 변화하게 되고, 이에 따라 전류루프의 주파수 특성이 변화하게 된다.

그림 3은 이산시간 영역에서의 100%부하 조건에서 입력 전압 변화에 따른 전류 루프 이득을 보여준다. 동일한 100% 부하 조건을 가정한 경우 입력 전압이 낮을 경우 인덕터 전류가 커져 인덕턴스 값이 작아져 전류 루프의 이득이 커지게 되며, 반대로 입력 전압이 높을 경우 인덕터 전류가 작아져 인덕턴스 값이 커져 전류 루프 이득이 작아지게 됨을 확인 할 수 있다.

2.3 제어기 이득 조정 기법

전류루프 제어기를 인덕터 전류가 가장 커서, 루프 이득이 가장 큰 180V_{rms} 100% 부하 조건을 기준으로 설계할 경우 전류 루프 제어기의 이득은 가장 낮은 값을 가지게 된다. 이 경우 전 입력 전압 조건에 대해 위상 마진 확보가 가능하나, 입력 전압이 커질수록 전류 루프의 crossover 주파수가 낮아져 전류 파형의 왜곡 현상이 커지게 된다. 반면, 전류 루프 제어기를 루프 이득이 가장 작은 264V_{rms} 100% 부하를 기준으로 설계 할 경우 제어기 이득은 큰 값을 가져, 전류 파형의 왜곡을 줄일 수 있으나, 입력 전압이 낮아 질수록 전류 루프의 이득이 커져 위상 마진 확보가 어렵게 되어 불안정 해지게 된다.

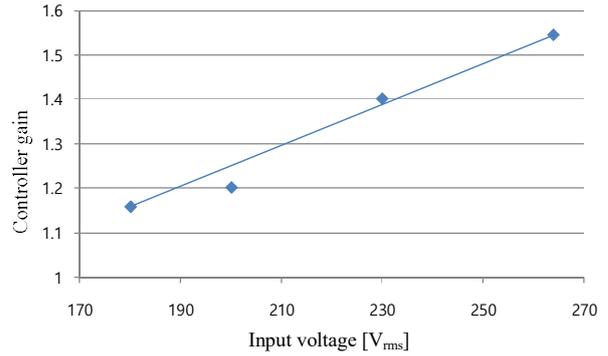
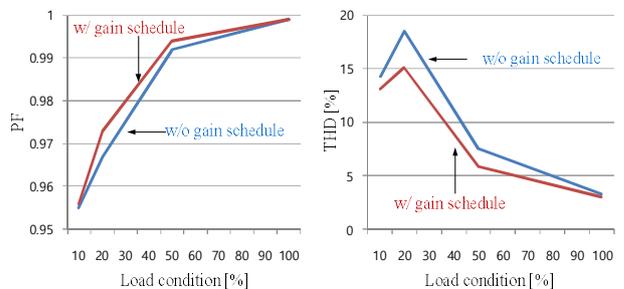


그림 4 입력 전압 변화에 따른 제어기 이득

그림 4는 입력 전압 변화에 따라 요구되는 제어기 이득을 나타낸다. 입력 전압이 낮을 경우 제어기 이득을 낮춰주고 입력 전압이 높을 경우 제어기 이득을 높여 줌으로써, 충분한 위상마진을 확보하며, 전류 파형의 왜곡을 효과적으로 감소 시킬 수 있다.

3. 실험 결과

제안된 제어기 이득 조정 기법의 유용성을 검증하기 위해 1.6kW 부스트 컨버터를 이용한 실험을 수행하였다. 그림 5는 전 입력 라인 조건에서 안정적인 동작이 가능하도록 180V_{rms} 100% 부하 조건을 기준으로 제어기 이득을 최소로 하여 설계한 경우와, 제안된 제어기 이득 조정 기법을 적용한 경우의 230V_{rms} 입력 조건에서의 PF와 THD를 측정된 결과를 나타낸 그래프이다. 제안된 기법의 경우 개선된 PF와 THD 성능을 보이고 있음을 확인 할 수 있다.



(a) PF (b) THD

그림 5 측정된 PF와 THD @ 230V_{rms}

4. 결론

본 논문에서는 제어기 이득 조정 기법을 이용한 PFC단 부스트 컨버터의 디지털 제어 기법을 제안하였다. 입력 전압 변화에 따른 부스트 인덕턴스 변화와 이에 따른 전류 루프의 주파수 특성 변화를 분석하여, 안정성을 확보하며 동시에 전류 파형의 왜곡을 최소화 하기 위해 제어기의 이득을 조정해 줌으로써, PF와 THD 성능을 개선 하였다.

참고 문헌

[1] L. H. Dixon, "Average Current Mode Control of Switching Power Supplies", *Unitrode Power Supply Design Seminar SEM-700*, 1990.