

임계 도통 모드 부스트 PFC 스위칭 손실 저감 기법

임천용, 정연호, 김재현, 문건우
한국과학기술원

Low switching loss for a critical mode boost power factor correction

Cheon-Yong Lim, Yeon-Ho Jeong, Jae-Hyun Kim and Gun-Woo Moon
Korea Advanced Institute of Science and Technology

ABSTRACT

가변 인덕터를 사용한 고효율 임계 도통 모드 (CRM) 부스트 power factor corrector (PFC) 을 제안한다. 입력 전압에 따라 부스트 인덕턴스 (L_B) 을 변화시킴으로써 고효율이 요구되는 $230 V_{ac}$ 의 노미날 입력 전압에서 스위칭 손실을 줄일 수 있다. 가변 인덕터는 코어에 충분한 직류 전류가 흐를 때 투자율이 변하는 코어 본연의 성질을 이용해 구현 가능하다. 노미날 입력시에는 큰 L_B 를 갖음으로써 스위칭 손실을 줄일 수 있다. $255 V_{ac}$ 이상의 큰 입력 전압이 들어오는 경우에는 인덕턴스를 줄여준다. 실험을 통해 제안한 컨버터의 성능을 검증하였다

1. 서론

CO_2 방출량이 늘어남에 따라 환경적 문제에 대한 경각심이 커지면서 고효율 에너지 변환은 중요한 이슈가 되었다. 서버용 전원장치는 일반적으로 크게 PFC 단과 DC/DC 전원단으로 구성된다. PFC 단은 입력 전압 (V_{line}) 과 입력 전류의 위상을 맞춰주기 위해 입력부에 위치하며 높은 PF 를 갖고 구조가 간단한 boost PFC 컨버터가 널리 사용된다. 출력이 높은 경우에는 도통 손실이 적은 연속 도통 모드 boost PFC 가 주로 사용된다. 하지만 출력 정류단에서의 역회복 특성이 좋지 않고 영전압 스위칭이 불가능함으로써 스위칭 손실이 커지는 문제가 있다. 출력이 낮은 경우에는 역회복 문제도 없을 뿐더러 밸리 스위칭이 가능함으로써 스위칭 손실을 줄일 수 있는 CRM boost PFC 가 많이 사용된다. 하지만 밸리 스위칭이 가능함에도 여전히 큰 스위칭 손실을 가지고 있다.

CRM boost PFC 의 전류 파형은 그림 1 와 같다. 스위칭 주기는 온-타임 (t_{on}) 과 오프-타임 (t_{off}) 으로 구성된다. t_{on} 과 t_{off} 은 V_{line} 의 반 주기에 대해 V_{line} 이 정점일 때 최대가 되며 그 때의 스위칭 주파수 ($f_{s,min}$) 은 아래와 같이 표현된다.

$$t_{on,max} = \frac{L_B}{V_{in,peak}} I_{L,peak}, \quad t_{off,max} = \frac{V_{in,peak}}{V_o - V_{in,peak}} t_{on} \quad (1)$$

$$f_{s,min} = \frac{1}{t_{on,max} + t_{off,max}} = \frac{1}{\frac{L_B}{\eta} \frac{P_o}{(\sqrt{2}V_{line})^2} 4 \frac{V_o}{V_o - \sqrt{2}V_{line}}}$$

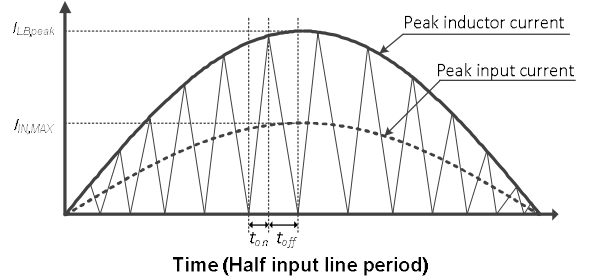


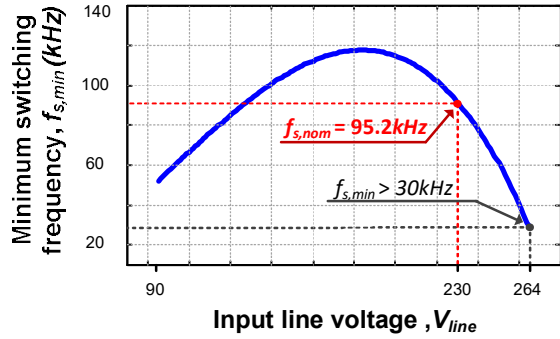
그림 1 V_{line} 반 주기 동안에 걸친 CRM 부스트 PFC의 인덕터 전류 파형

(1)의 수식으로부터 고정된 L_B 와 P_o 에 대해 $f_{s,min}$ 은 V_{line} 에 의해 결정되며 그림 2(a) 에서와 같이 universal 입력 전압에 대해 V_{line} 이 최대일 때 최소값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 또한 $f_{s,min}$ 은 L_B 에 의해서도 변하는 것을 확인할 수 있는데 이 때 L_B 은 $f_{s,min}$ 의 최소값이 $30 kHz$ 이상이 되도록 설계된다. 이는 스위칭 주파수가 가청 주파수 영역 안으로 들어오는 것을 막기 위함으로써 L_B 설계 시 필수 사항이다. 결국 L_B 은 작은 값을 갖도록 설계 되며 이는 고효율이 요구되는 $230 V_{ac}$ 의 입력 전압에서 스위칭 주파수를 높임으로써 스위칭 손실을 증가시킨다. $230 V_{ac}$ 에서 스위칭 손실이 높아지는 문제를 해결하기 위해 가변 인덕터를 이용한 새로운 CRM boost PFC 을 제안한다.

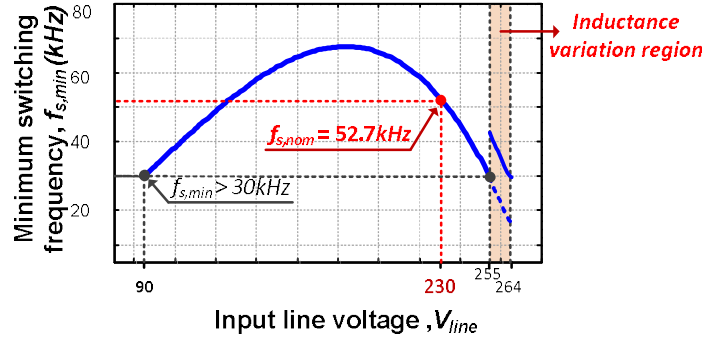
2. 제안된 컨버터의 설명

2.1 제안된 컨버터의 개념

제안된 컨버터는 최소 입력 전압 ($=90 V_{ac}$) 에서 $f_{s,min}$ 이 최소가 되도록, 즉, 최소 입력 전압에서의 $f_{s,min}$ 이 $30 kHz$ 가 되도록 L_B 을 설계한다. 이 경우에는 기존의 최대 입력 전압 ($=264 V_{ac}$) 에서의 $f_{s,min}$ 이 $30 kHz$ 가 되도록 설계한 경우보다 L_B 값이 커지며 이는 식 1 에서처럼 스위칭 주파수를 낮추는 결과를 가져온다. 결국 높은 효율이 요구되는 $230 V_{ac}$ 입력에서 스위칭 손실을 줄임으로써 효율을 향상시킬 수 있다. 하지만 이렇게 L_B 가 큰 값을 갖도록 설계하면, 그림 2(b) 에서 보는 것과 같이 입력 전압이 $255 V_{ac}$ 보다 커지는 경우에는 $f_{s,min}$ 이 $30 kHz$ 보다 작아지는 문제가 발생한다. 이는 앞서 언급하였던, $f_{s,min}$ 의 최소값이 $30 kHz$ 이상이 되도록 L_B 가 설계돼야 한다는 조건에 어긋나게 되는데, 따라서 $255 V_{ac}$ 보다 큰 입력 전압이 들어오는 경우에는 인덕턴스를 작은 값으로 가변함으로써 $f_{s,min}$ 이 $30 kHz$ 이상이 되도록 유지시켜 준다.



(a) 기존 컨버터 ($f_{s,nom}=95.2\text{kHz}$).



(b) 제안된 컨버터 ($f_{s,nom}=52.7\text{kHz}$).

그림 2. 최대 부하 조건에서 universal 입력 전압에 따른 $f_{s,min}$

2.2 제안 방식의 구현

가변 인덕터는 B-H 곡선에서 기울기가 변하는 영역을 이용해 구현 가능하다. 본 실험에서는 그림 3 에서와 같이 가운데 레그의 와인딩과 양 쪽 레그의 사이드 와인딩이 감겨 있는 EE 코어가 사용되었다. 이 때 충분한 양의 직류 전류 (I_{Bias}) 가 사이드 와인딩을 통해 흐르게 되면 EE 코어의 테두리 부근의 투자율이 변하게 되면서 L_B 가 변하게 된다. 즉 L_B 는 I_{Bias} 에 의해 조절될 수 있다^[1].

결국, 230 V_{ac} 의 입력전압에서는 I_{Bias} 를 흘려주지 않음으로써 큰 L_B 를 갖고 입력 전압이 255 V_{ac} 보다 커지는 경우에는 I_{Bias} 가 흐름으로써 L_B 가 줄어든다.

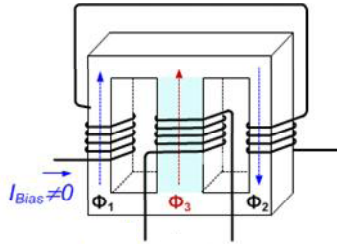


그림 3 가변 인덕터의 구현

3. 실험결과

교류입력전압은 universal line(90~264 V_{ac}) 의 조건을 가지며, 출력 조건은 12 V/200 W 이다. 회로에 사용된 소자는 표 2 와 같다.

표 2 은 기존 컨버터와 제안된 컨버터의 각 부하별 스위칭 주파수를 보여준다. 제안 된 컨버터의 경우 전부하에 걸쳐 스위칭 주파수가 더 작은 것을 확인할 수 있다. 그림 4 은 각 부하별 효율을 나타낸다. 제안 된 컨버터의 효율이 전 부하에 걸쳐 향상됨을 확인할 수 있다.

소자 목록	기존 컨버터	제안된 컨버터
부스트 인덕터 (L_B)	Core: EE3427 L_B : 240 μH	Core: EE3427 L_B : 440 μH
스위치	SPP24N60C3	
다이오드	10ETF06	
링크 커패시터	68 μF x 3	

표 1 사용된 소자

부하 조건	스위칭 주파수 (kHz)	
	기존 컨버터	제안된 컨버터
100%	82	54
80%	106	64
50%	145	93
20%	250	175

표 2 기존 컨버터와 제안된 컨버터의 각 부하별 스위칭 주파수

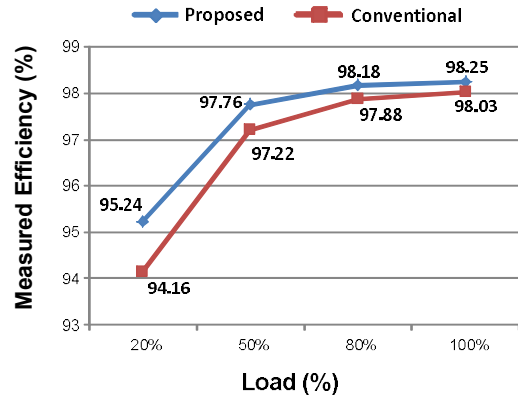


그림 4 기존 컨버터와 제안 된 컨버터의 각 부하별 효율

4. 결론

본 논문에서는 가변 인덕터를 이용한 고효율 임계 도통 모드 부스트 PFC 를 제안하였고, 제안한 컨버터의 효율이 전부하에 걸쳐 향상됨을 실험적으로 증명하였다.

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2010-0028680).

참고 문헌

[1] D. Medini, and B.Y.S, "A current-controlled variable-inductor for high frequency resonant power circuits," in Proc. APEC 1994, Feb. 1994, vol.1, pp. 219-225