

가전제품용 전력변환 장치의 PFC 구조에 따른 시스템 효율 분석 및 설계

박상민, 김동희, 주동명, 김민중, 이병국[†]
 성균관대학교 정보통신대학

Efficiency and Design Analysis of Power Conversion Unit for Household Appliances according to PFC Type

Sang Min Park, Dong Hee Kim, Dong Myoung Joo, Min Jung Kim, and Byoung Kuk Lee[†]
 College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문은 PFC (Power Factor Correction)와 절연형 DC DC 컨버터의 2단 구조를 갖는 가전제품용 저전압 시스템의 효율을 분석하며, 이에 따른 Buck 및 Boost PFC 토폴로지와 절연형 DC DC 컨버터 효율 및 설계 차이점을 비교한다. PFC 구조에 따른 각 시스템의 역률 규제 만족 여부와 시스템 효율을 이론적 해석 및 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

계통전원을 사용하는 가전기기용 전력변환장치는 국제 고조파 전류 규제 IEC61000 3 2를 만족해야한다. 따라서 역률개선을 위한 PFC회로가 필요하며 일반적으로 입력 전류가 연속이고 구조가 간단한 Boost PFC가 사용되고 있다. 또한 1차측과 2차측의 절연 규격을 만족하기 위해 절연형 DC DC 컨버터가 필요하다. 그러나 수십 V의 전압을 요구하는 가전제품에 비해 Boost PFC는 출력전압이 380V_{dc} 내외로 높게 결정된다. PFC 단의 높은 출력전압은 DC DC 컨버터 소자 스트레스 및 전체적 부피를 증가시키고 입력전압을 낮출 경우 높은 듀티비에서 동작하게 되며 이에 따라 손실이 증가하고 시스템의 전력 밀도를 감소시킨다^[1]. 반면에 Buck PFC를 사용하면 강압 강압 구조이기 때문에 스위치의 스트레스가 낮아지며 DC DC 컨버터의 부피를 줄일 수 있다. 그러나 Buck PFC는 입력전류가 불연속이고 Boost PFC에 비해 상대적으로 역률이 낮다. 따라서 IEC61000 3 2 고조파 전류 규제를 만족하는 역률을 얻기 위해서는 그림 1과 같이 입력 단계 DM필터 (Differential Mode filter)를 달아 입력전류를 연속으로 만들어줘야 한다^[2].

본 논문에서는 가전용 어플리케이션을 대상으로 하는 300W 급 Buck PFC를 사용하여 기존의 Boost PFC 시스템과 효율 및 역률을 비교한다.

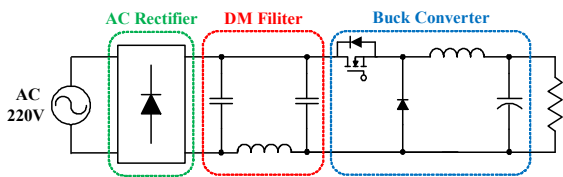


그림 1 Buck PFC 구조
 Fig. 1 The structure of buck PFC

표 1 PFC단 시스템 파라미터

Table 1 PFC stage system parameters

Parameter	Boost PFC	Buck PFC
Input Voltage	220 [V _{ac}]	
Output Power	300 [W]	
Output Voltage	380 [V _{dc}]	200 [V _{dc}]
f _{sw}	50 [kHz]	

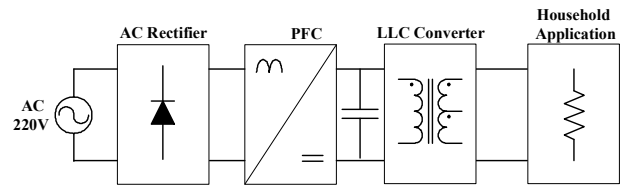


그림 2 300W 절연형 2단 구조 전력변환장치
 Fig. 2 Two-stage isolated power conversion system

2. 시스템 효율 분석 및 설계

2.1. PFC 손실 측정 및 효율 비교

본 논문에서는 그림 2와 같이 2단 구조를 갖는 전력변환장치에서 절연형 DC DC 컨버터는 소프트 스위칭이 가능한 LLC 공진형 컨버터를 사용한다. 시스템 파라미터의 사양은 표 1과 같다. PFC단에서의 역률과 효율을 비교하고 LLC 공진형 컨버터 설계 차이점과 손실 및 효율을 분석해 전체적 시스템 효율을 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

PFC 손실 측정 및 효율 비교 방법은 Boost PFC와 Buck PFC 각각의 경우를 PSIM 시뮬레이션 Thermal module을 사용하여 반도체 소자 손실을 측정하고 수학적 분석을 통해 인덕터 손실을 계산하여 두 가지 토폴로지의 효율을 비교한다. 입력전원은 국내 기준에 따라 220V_{ac} 교류 상용전원으로 고정하고 역률과 입력전류 고조파성분을 측정하여 IEC61000 3 2 규제의 만족 여부를 검증한다. 손실은 브릿지 다이오드 정류기, 스위치, 정류 다이오드와 인덕터 총 4가지 소자들을 분석한다.

시뮬레이션 결과 Boost PFC의 역률은 100% 부하일 때 0.984으로 Buck PFC의 역률 0.931 보다 더 높게 나오며 각각의 입력전류 고조파 성분은 그림 3과 같다. 또한 PFC단 각 소자별 손실은 표 3과 같다. Buck PFC는 입력 DM필터로 인해 인덕터 손실이 그림 4의 결과와 같이 Boost PFC 보다 높지만 낮은 출력전압과 강압 강압 구조 때문에 반도체 소자들의 손실이 감소하여 총 효율은 0.1% 더 높다.

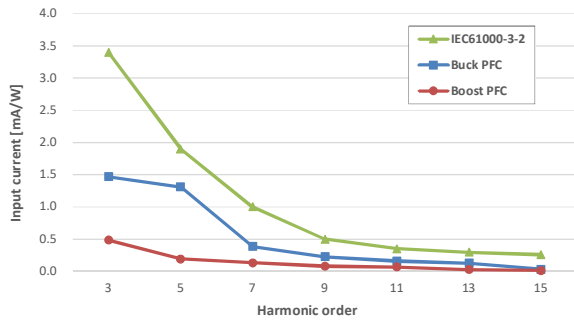


그림 3 고조파 입력전류와 IEC61000-3-2 규제 Class-D
Fig. 3 Input current harmonics and IEC61000-3-2

2.2. LLC 공진형 컨버터 손실 측정 및 효율 비교

Boost PFC 출력 380V_{dc}와 Buck PFC 출력 200V_{dc}를 입력으로 갖는 LLC 공진형 컨버터의 시스템 파라미터 사양은 표 2와 같다. 변압기의 코어는 TDK사의 PC95PQ2625로 동일하게 선정하고 식 (1)과 AWG 전선 규격 도선 저항값을 참고하여 철손과 동손을 계산한다. 스위치와 다이오드 손실은 PFC단과 마찬가지로 PSIM 시뮬레이션 Thermal module을 사용하여 분석한다.

$$B_{max} = \frac{L_P \cdot I_{LM,peak}}{N_P \cdot A_c}, \quad (L_P = L_r + L_m) \quad (1)$$

각각의 LLC 공진형 컨버터 시스템에서 2차측 다이오드 전류 평균값은 같기 때문에 표 3에서 볼 수 있듯이 다이오드 손실이 같다. Buck 토폴로지 LLC 공진형 컨버터의 낮은 입력전압은 변압기의 권선비를 낮게 설계할 수 있으며 철손과 스위치 손실을 감소시켜 Boost 토폴로지 LLC 공진형 컨버터보다 0.8% 높은 효율을 보여준다.

표 2 LLC 컨버터 시스템 파라미터
Table 2 System parameters of LLC converter

Parameter	Boost LLC	Buck LLC
Input Voltage	380 [V _{dc}]	200 [V _{dc}]
Output Power	300 [W]	
Output Voltage	40 [V _{dc}]	
N _T (N ₁ /N ₂)	4.75	2.5
L _r	26.5 [μH]	7.3 [μH]
C _r	19.7 [nF]	71.4 [nF]
R _L	5.3-16 [Ω]	
f _{sw}	220 [kHz]	

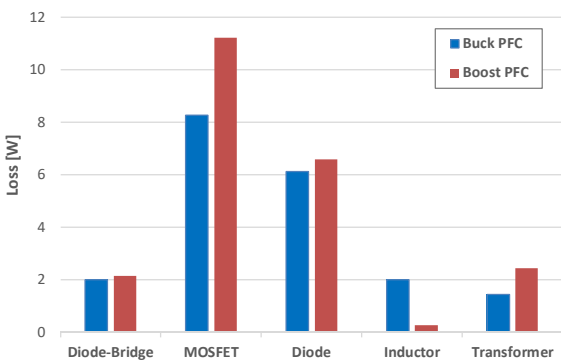


그림 4 전체 시스템 소자별 손실
Fig. 4 Loss of system device

표 3 소자별 손실

Table 3 Loss of device

Loss [W]	PFC stage		LLC stage	
	Boost	Buck	Boost	Buck
Diode-bridge	2.15	1.99	X	X
MOSFET	2.72	1.33	4.26	3.47
Diode	0.99	0.52	2.8	2.8
Inductor	0.27	2	X	X
Transformer	X	X	2.44	1.43
Total loss	6.13	5.84	16.5	13.9

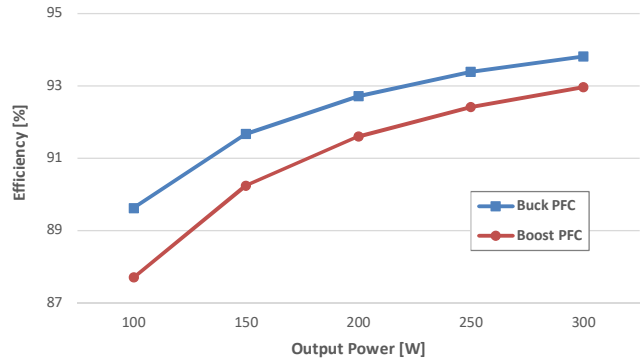


그림 5 전체 시스템 효율 비교

Fig. 5 Measured system efficiency comparison

2.3. 시스템 설계 및 시뮬레이션 결과

강압 강압형 Buck PFC 토폴로지는 승압 강압형 Boost PFC 토폴로지보다 낮은 출력전압으로 반도체 소자들의 손실을 줄이고 소자 정격전압을 낮게 구현 할 수 있으며 변압기의 손실을 줄일 수 있다.

출력 40V_{dc} 부하 30 100% 에서 PSIM 시뮬레이션 결과 그림 5의 결과와 같이 Buck PFC 토폴로지가 PFC 단에서 0.1%, LLC 컨버터 단에서 0.8%의 높은 효율을 얻었으며 전체적인 시스템 효율은 전 부하 구간에서 Boost PFC보다 약 1% 이상 높은 효율을 유지한다.

3. 결론

본 논문은 가전용 어플리케이션을 대상으로 하는 300W급 전력변환장치의 토폴로지 구조 설계 및 효율을 비교분석 하였다. Buck PFC는 Boost PFC보다 낮은 PFC단 출력전압 덕분에 LLC 컨버터의 변압기의 손실 및 부피를 작게 설계 할 수 있었다. 전체적 시스템 효율은 PFC 단과 DC DC 컨버터 단에서 PSIM Thermal module과 수학적 분석을 통하여 얻은 손실을 토대로 효율을 계산하였다. 계산 결과 전 부하 구간에서 Buck PFC가 Boost PFC보다 1% 이상 높은 효율을 획득하였다.

참고 문헌

- [1] Xiaogao Xie, "An Improved Buck PFC Converter With High Power Factor", IEEE Transactions on power electronics, Vol. 28, NO. 5, May, 2013
- [2] Laszlo Huber, "Design Oriented Analysis and Performance Evaluation of Buck PFC Front End", IEEE Transactions on power electronics, Vol. 25, NO. 1, January, 2010