

공진형 보조 회로를 이용한 연속 전류 모드 S⁴-PFC 컨버터에 관한 연구

한대희, 김용, 배진용, 이은영, 권순도
 동국대학교, 대림대학

A Study on the Continuous Current Mode S⁴-PFC Converter using Auxiliary Resonant Circuit

Dae-Hee Han, Yong Kim, Jin-Yong Bae, Eun-Young Lee, Soon-Do Kwon
 Dongguk University, Daelim College

Abstract - This paper presents Continuous-current mode of S⁴-PFC(Single-Stage Single-switch Power Factor Correction) converter. Proposed converter operates in the continuous current mode(CCM) at full load and discontinuous current mode(DCM) at light load. So, characteristic of proposed converter is no bus voltage stress and Zero Voltage Switching(ZVS) using resonant auxiliary circuit. And, This paper presents characteristic of S⁴-PFC converter and effect of circuit parameter of proposed converter through the input inductor, PFC capacitor's variation. All of these theory and characteristic verified through the experiment with a 72W(12V,6A), 90 μ s prototype converter.

1. 서 론

일반적으로 S⁴-PFC 컨버터의 경우 중부하를 기준으로 연속·불연속 전류 모드로 나누어지게 되는데, 불연속 전류 모드의 경우 중·경부하시 불연속 전류 모드로 동작하도록 설계되며, 일정한 듀티주기를 제어하여 역률개선을 이루고 있다. 그러나 이 경우 EMI필터의 크기가 크고, 효율이 낮은 단점을 갖는다.[1-4]

한편, S⁴-PFC 컨버터를 연속 전류 모드로 운전하는 경우 EMI 필터의 크기 축소 및 스위치 전류 스트레스 저감 등의 장점을 지니고 있으나 아직까지 설계 및 회로 해석에 대한 이론 정립이 명확하게 이루어지지 못한 실정에 있다. 따라서 본 논문에서는 S⁴-PFC 컨버터의 역률과 효율에 가장 큰 영향을 미치는 입력 인덕터와 역률 개선용 커패시터의 크기에 따른 컨버터의 특성변화를 실험을 통하여 확인하고, 1차측 회로의 크기를 결정하는 탱크 커패시터의 전압에 대해서 해석함으로써 중부하시 연속 전류 모드로 동작하고, 경부하시에는 불연속 전류 모드로 동작하는 S⁴-PFC 컨버터의 설계 및 회로 해석의 가능성을 제시하였다.

실험에 사용한 S⁴-PFC 컨버터는 72W(12V, 6A, 90 μ s)급의 정격을 지니며 중부하시 연속 전류 모드로 동작 된다.

2. 본 론

2.1 제안된 연속 전류 모드 S⁴-PFC 컨버터

그림 1은 제안된 S⁴-PFC 컨버터 회로로 일반적인 풀브리덱 컨버터에 부스트 컨버터가 단일 스위치에 의해 결합된 형태이다. 이러한 컨버터는 별도의 전류제어 없이 전압제어만으로 역률 개선을 이룰 수 있는 구조를 지닌다.

그림 1에서 점선으로 표시된 부분은 보조 회로를 나타낸다. C_r과 C_s는 역률 개선을 위한 커패시터로, 특히 C_s는 입력 인덕터(L_{in})와 함께 정현파 입력 전류를 얻을 수 있도록 동작하며, 스너버 커패시터의 역할을 한다.

PFC 커패시터 중 다른 하나인 C_r은 버스 전압의 레벨을 낮추는 역할을 하며, C_r의 크기는 일반적으로 수십 nF의 크기를

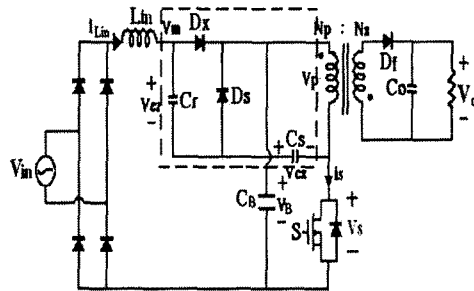


그림 1. 제안된 연속 전류 모드 S⁴-PFC 컨버터 회로
 갖는다.[3]

2.2 제안된 컨버터의 버스 전압

버스 전압의 과도한 상승을 방지하기 위해서는 역률개선단과 DC/DC단이 모두 연속 전류 모드나 불연속 전류 모드중 하나의 모드로 동작하여야 한다.[5]

제안된 컨버터에서는 버스 전압이 최대치에 도달하는 경부하시 두 단 모두가 불연속 전류 모드로 동작하게 된다. 이 경우 도전손실은 증가하며 도전손실의 대부분은 스위칭손실로 효율은 저하된다.[8]

2.3 경부하 상태에서 버스 전압 레벨의 산출

버스 전압 레벨을 결정하기 위해 아래와 같은 가정을 한다.

- 1) 중부하에서 역률 개선단과 DC/DC 단은 모두 연속 전류 모드로 동작하며, 경부하 상태에서는 두 단 모두 불연속 전류 모드로 동작한다.
- 2) 모든 회로의 소자들은 이상적이다.
- 3) PFC커패시터 전압은 일정하고, 변압기 1차측에 인가되는 전압과 같다.

버스 전압 레벨을 결정하기 위해서 스위치 온 상태 일 때, 컨버터의 입력 에너지(W_{in1})를 구하면 식 (1)과 같다.

$$W_{in1} = \frac{1}{2} \times V_{in} \times (V_{in} + V_{ref}) \times D^2 \times \frac{T}{L_{in}} \quad (1)$$

여기서 V_{ref} : 변압기 1차측에 걸리는 전압
 V_{in} : 스위칭 온주기 동안 입력 전압
 D : 스위치의 듀티 주기
 T : 스위칭 주기

L_{in} : 입력 인덕터

스위치 오프 시 컨버터의 입력 에너지(W_{in2})는 식(2)와 같다.

$$W_{in2} = \frac{1}{2} \times V_{in} \times (V_{in} + V_{ref})^2 \times D^2 \times \frac{T^2}{L_{in}(V_B - V_{in})} \quad (2)$$

스위치 온 시간 동안 벅크 커패시터(C_B)에서 자화 인덕터(L_m)로 전송되는 전력(P_{in})은 식(3)과 같다. 여기서 V_B 는 버스 전압을 의미한다.

$$P_{in} = \frac{1}{2} \times \frac{V_B^2}{L_m} \times D^2 \times T \quad (3)$$

스위치 온 시, PFC커패시터(C_{pfc})는 입력 전류에 의해 충전되며, 자화 인덕터는 스위치가 오프되고 난 후, PFC커패시터(C_{pfc})를 재충전시킨다. 이 때 PFC커패시터에 저장된 에너지(W_{Cpfc})는 식(4)와 같다.

$$W_{Cpfc} = \frac{1}{2} \times V_{ref} \times (V_{in} + V_{ref}) \times \frac{(DT)^2}{L_{in}} \quad (4)$$

도통 시간동안 컨버터의 평균 입력 전력은 식(5)와 같다.

$$P_{in1} = \frac{1}{4} \times V_{in_{max}} \times D^2 \times T \times \frac{V_{in_{max}} \times \pi + 4 \times V_{ref}}{L_{in} \times \pi} \quad (5)$$

스위치 오프 시간 동안 컨버터의 평균 입력 전력은 식(6)과 같다.

$$P_{in2} = \frac{\omega \times D^2 \times T}{2 \times \pi \times L_{in}} \times \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} \frac{V_{in}(V_{in} + V_{ref})^2}{V_B - V_{in}} dt \quad (6)$$

평균 출력 전력은 자화 인덕터에 저장된 전력에서 PFC 커패시터(C_{pfc})의 재충전에 필요한 전력을 뺀 것과 같으므로 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{out} = \frac{1}{2} \times D^2 \times T \times \left(\frac{V_B^2}{L_m} - V_{ref} \right) \times \frac{2 \times V_{in_{max}} + V_{ref} \times \pi}{\pi \times L_{in}} \quad (7)$$

따라서 컨버터의 출력 전력은 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{out} = (P_{in1} + P_{in2}) \times \eta \quad (8)$$

입력·출력은 스위치 듀티주기의 제곱에 비례함을 알 수 있다. [1,5] 식 (6),(7),(8)을 식(9)에 대입하면, 듀티 주기(D)는 소거되고, 결과적으로 버스전압에 대한 관계식만 남게 된다. 식 (8)에 대입하여 L_{in} 과 L_m 의 관계를 유도하면 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{L_{in}}{L_m} = \frac{56998.96V_B - 7088162}{V_B^3 - 146.44V_B^2} \quad (10)$$

식(10)에서 입력 인덕터와 자화 인덕터의 비율을 0.5 간격으로 1에서 7까지 증가시킬 때, 버스 전압의 이론

적인 레벨은 그림 2로 나타낼 수 있다.

제한한 컨버터의 경우 버스 전압의 이론적인 값은 약 140V이다.

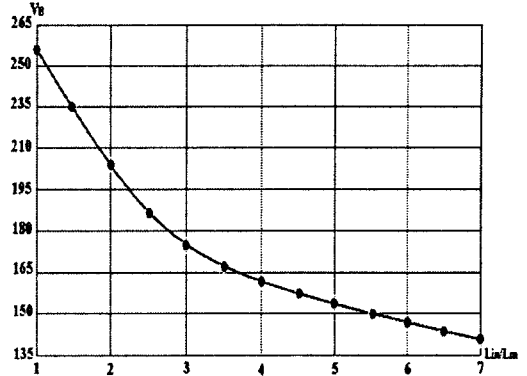


그림 2. 입력 인덕터와 자화 인덕터의 비에 따른 이론적인 버스 전압 레벨

2.4 실험 결과

제안된 방식의 타당성을 검증하기 위해 90μ, 72W S⁴-PFC컨버터를 제작하여 실험하였다. 표 1은 하드웨어 제작에 사용한 소자와 회로 파라미터 값을 나타낸다.

표 1. 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터

입력 전압 (Input Voltage)	110V _{rms}
출력 전압·전류	12Vdc, 6A(72W)
스위칭 주파수(F_s)	90kHz
최대 듀티	0.49
효율(η)	70%이상
입력 인덕터(L_{in})	579.62μH, 672.99μH, 800μH
PFC커패시터 ($C_{pfc}=C_r+C_s$)	2.8nF, 4.04nF, 5.19nF, 6.87nF, 7.67nF
1차측 다이오드(D_x, D_s)	DSEI 20-12A, IXYS
2차측 다이오드(D_f)	DSEK 16-01A, IXYS
주 변압기	PQ2625, MAGNETICS 36:5, $L_{lk}=15\mu H$
주 스위치(S)	K2676 SHINDENGEN (MOSFET)
출력단 커패시터	2200μF

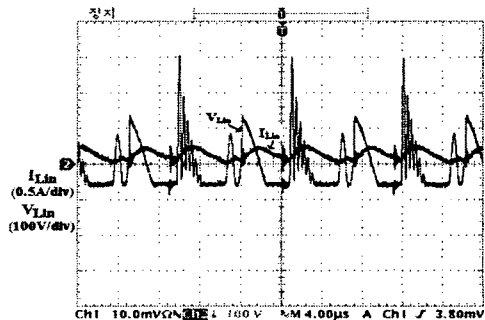


그림 3. 입력 인덕터의 전압·전류 파형

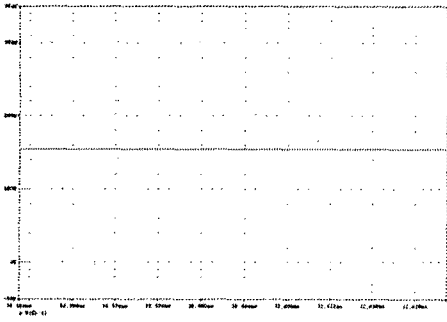


그림 4. 뱅크 커패시터의 전압 파형(시뮬레이션)

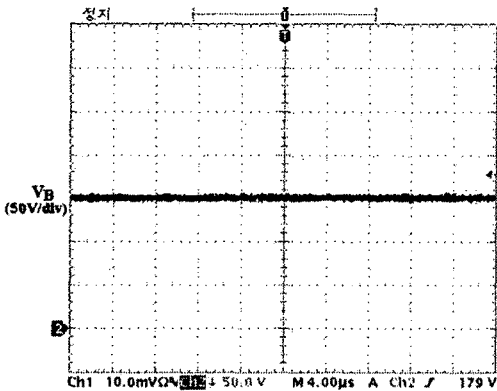


그림 5. 뱅크 커패시터의 전압 파형(실험)

그림 3은 입력 인덕터의 전압·전류 파형을 나타내며 전류가 연속적임을 알 수 있다.

그림 4는 뱅크 커패시터 전압(버스전압: V_B)의 시뮬레이션 파형을 나타내며, 그림 5는 실험 파형을 나타낸다. 그림 4와 5를 비교해 보면 약 10V정도 차이가 나는 것을 확인할 수 있는데 이것은 누설 인덕터에 축적된 에너지의 방출에 의해 버스 전압이 증가하기 때문이라 할 수 있다.

버스 전압의 크기에 따라서 뱅크 커패시터의 정격이 결정되므로 버스 전압은 전체적인 회로의 크기를 결정하는 중요한 파라미터라 할 수 있다.

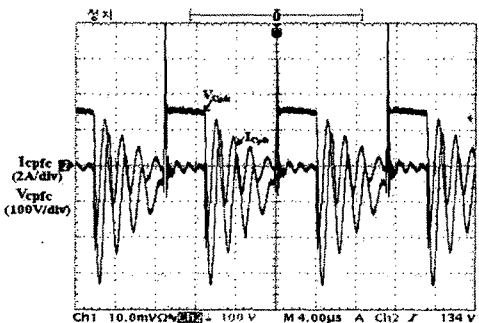


그림 6. PFC 커패시터(C_r , C_s)의 전압·전류 파형

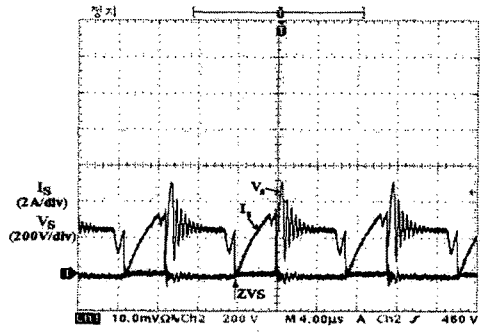


그림 7. 스위치의 전압·전류 파형

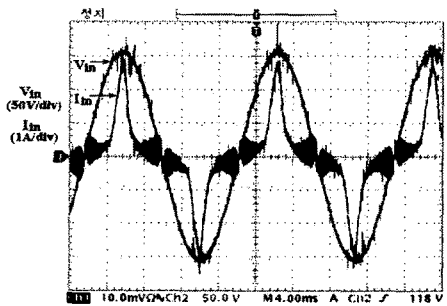


그림 8. 입력 전압·전류 파형

그림 6은 PFC 커패시터(C_{pfc})의 양단에 인가되는 전압·전류의 파형을 나타내며 이때 커패시터에 충전되는 전압은 스위치 온시에 변압기 1차측에 인가되는 전압과 같다.

그림 7은 스위치에 인가되는 전압·전류 파형을 나타내며 스위치 온시에 영전압 스위칭(ZVS)이 이루어짐을 알 수 있다.

그림 8은 입력 전압·전류의 실험 파형을 나타내며 입력 반주기마다 고조파 성분이 나타나는 것을 알 수 있다.

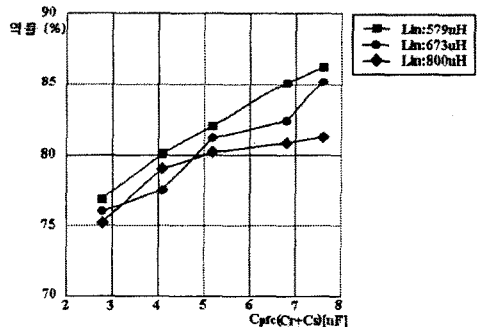


그림 9. PFC 커패시터와 입력인덕터의 변화에 따른 역률 특성 곡선

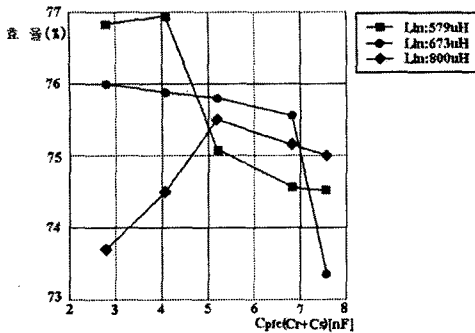


그림 10. PFC커패시터와 입력 인덕터의 변화에 따른 효율 특성 곡선

그림 9와 10은 PFC커패시터와 입력 인덕터의 변화에 따른 효율·효율 곡선을 나타낸다. PFC커패시터의 크기가 크면 클수록 효율은 향상됨을 알 수 있으나, 일정값을 넘으면 효율을 감소시키는 문제점이 있다. 또한, 입력 인덕터의 크기가 크면 클수록 효율을 저하시키는 경향을 갖는다.

3. 결 론

본 논문에서는 연속 전류 모드로 동작하는 S^4 -PFC 컨버터의 특성에 대해서 논의하였다. 효율과 효율에 가장 큰 영향을 끼치는 입력 인덕터(L_{in})와 PFC커패시터($C_{pfc} = C_r + C_a$)의 크기에 따른 효율·효율 특성 변화를 살펴보고, 국제 고조파 규제(IEC 1000-3-2)에 적합한 효율 특성을 나타내며, 동시에 효율을 극대화시키는 값으로 최적의 PFC커패시터와 입력 인덕터를 산정하여 주요 부분 파형을 나타내었다.

앞으로 좀 더 많은 연구를 통하여 연속 전류 모드 S^4 -PFC 컨버터의 구체적인 설계 이론 확립에 중점을 두어야 할 것으로 생각한다.

[참고 문헌]

- [1] R. Erickson, M. Madigan, and S. Singer, "Design of a simple high power factor rectifier based on the flyback converter" in IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1990, pp.792-801.
- [2] Jinrong Qian, Member, IEEE, and Fred C. Y. Lee, Fellow, IEEE "A High-Efficiency Single-Stage Single Switch High-Power-Factor AC/DC Converter with Universal Input", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 13, NO. 4, JULY 1998, pp.699-705
- [3] Jinrong Qian, Qun Zhao and Fred C. Lee "Single-Stage Single-Switch Power Factor Correction(S^4 -PFC) AC/DC Converters with DC Bus Voltage Feedback for Universal Line Applications" 1998 IEEE, pp.223-229
- [4] 한대회, 김용, 백수현, 배진용, 김필수 "공진형 보조회로를 이용한 고역률 AC/DC 컨버터에 관한 연구", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회, 하계학술대회 논문집, pp. 1110-1113, KIEE 2002 하계학술대회.
- [5] 김학원, 문건우, 조관열, 윤명중, "90-265V_{rms} 입력 범위를 갖는 단일 전력단 고역률 컨버터", 전력전자 학회 논문지, pp.18-29, 2002년 2월
- [6] J. Qian, F. C. Lee, and T. Yamauchi, "Current source charge pump high power factor electronic ballast", in IEEE Power Electronics Specialists Conf, pp.66-71, 1998
- [7] L. Huber, M. M. Jovanovic "Single-Stage, single-switch, Isolated power supply technique with

input-current sharpening and fast output-voltage regulation for universal input-voltage range applications," IEEE Applied Power Electronics Conference, pp.272-280, 1997

[8] M. M. Jovanovic, D. M Tsang and F. C. Lee, "Reduction of voltage stress in Integrated high q_r uality rectifier r-regulators by variable frequency control," IEEE Applied Power Electronics Conference, pp.281-287, 1997.