

전류 불연속 모드로 동작하는 1단 방식의 역률 보상 AC/DC 파워드 컨버터

강필순, 김원호, 박성준*, 김철우
부산대학교, 거제대학교*

A Single-Stage PFC AC/DC Forward Converter With Semi-automatic Current Shaping

Feel-Soon Kang, Won-Ho Kim, Sung-Jun Park*, Cheul-U Kim
Pusan National University, Koje College*

Abstract

This paper presents a novel single-stage Power Factor Corrected(PFC) AC/DC forward converter with semi-automatic current shaping in order to achieve the unity power factor and an isolated output. Since the proposed circuit is combined a boost converter used for PFCs with a forward converter used for DC to DC conversion, the overall size of system could be reduced. And thanks to the zero voltage switching(ZVS) in both switches, the voltage stress can be reduced considerably. A simple auxiliary circuit adopted into the secondary of transformer is composed of lossless components for reducing surge voltage.

A prototype which has two IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) modules as switching device is manufactured to evaluate the proposed topology. The characteristics of the proposed circuit are tested, and the validity is verified by experimental results.

I. 서 론

역률 보상 회로의 일반적인 형태인 이단방식은 단위 역률을 이루기 위한 역률 보상 회로단과 안정된 직류출력전압을 얻기 위한 DC/DC 컨버터단의 두 단으로 구성된다. 이 방식은 입력 전원 주파 두 배만큼의 저주파 리플이 DC-link 전압에 존재하게 되지만, 출력단에는 저주파 리플이 존재하지 않는다. 그러나, 두 번의 전력변환으로 인한 전체 효율의 감소, 시스템 구성의 복잡화, 고가화 되는 단점을 지닌다. 이들 문제를 해결하기 위해 최근에는 단위 역률과 안정된 출력전압을 동시에 얻을 수 있는 간단한 구조의 1단 방식이 많이 연구되고 있다[2].

본 논문에서는 역률 보상을 부스터 컨버터의 스위치와 다이오드를 DC/DC 컨버터의 것으로 대체하여 1단 방식으로 구성하고, 그림 1과 같이 전류 불연속 모드(discontinuous conduction mode: DCM)로 동작시켜 입력전류나 전압의 센싱(sensing) 없이 일정 시비율(duty ratio)로 주소자를 위치하여 입력전류의 피크값이 저절로 정현파가 되도록 설계(semi-automatic current shaping)하였다[1,2].

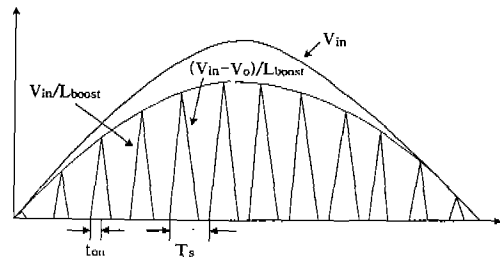


그림 1. 불연속 모드의 입력 인덕터 전류
Fig. 1 Input inductor current in DCM

그리고, 두 개의 스위치를 동시에 ON, OFF 제어하여 스위칭 간섭을 억제하였을 뿐만 아니라, 영전압 스위칭(zero-voltage switching: ZVS)을 하여 스위칭 소자의 전압 스트레스를 감소시켰다[3~5]. 제안된 토폴라지의 단위 역률과 소프트 스위칭을 실험결과를 통하여 입증한다.

II. 본 론

제안하는 1단 방식의 역률 보상 AC/DC 파워드 컨버터는 전체 시스템의 부피를 감소시킬 수 있고, 하나의 전력 변환단으로 구성함으로써 효율을 증대시킬 수 있다. 그리고, 스위치의 Turn-ON, OFF시 변압기의 누설 인덕턴스와 반도체 소자의 기생 커패시턴스로 인하여 발생하는 2차측 정류단의 surge전압을 감소시키기 위해 간단한 보조회로를 삽입하였다. 보조

회로를 삽입한 주회로도가 그림 2(a)에 제시된다.

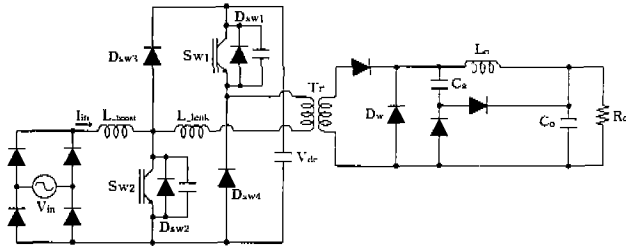


그림 2(a). 주 회로도
Fig. 2(a). The main circuit

제안된 토폴라지는 반주기 동안 6가지의 동작 모드가 존재하게 되며, 이 회로의 스위칭 신호와 동작 파형을 그림 2(b)에 나타내었다.

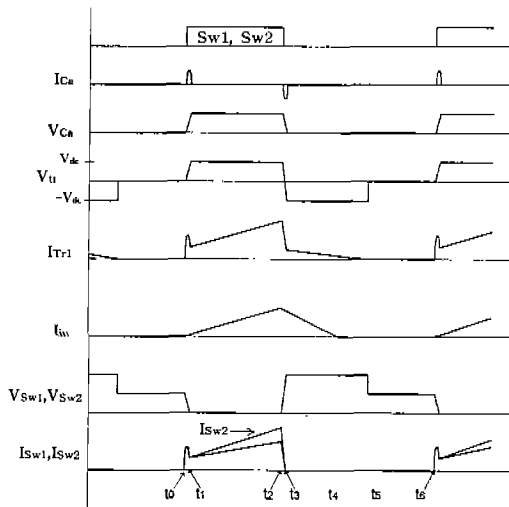


그림 2(b). 스위칭 신호와 동작파형
Fig. 2(b). Switching signals and waveforms

정상 상태 동작을 설명하기 위하여 모든 소자는 이상적이고 스위칭 주기동안에 에너지 축적 커패시터 (V_{dc})의 전압은 정전압원으로 가정한다.

각 모드별 회로의 상태를 그림 3(a)-(f)에 나타내었고, 스위칭 반주기에 대하여 각 모드별로 해석한다.

Mode 1 [$t_0 - t_1$]: t_0 에서 스위치 Sw_1 과 Sw_2 가 영전압 Turn-ON이 되면 스위치의 기생 커패시턴스 (C_{Sw1}, C_{Sw2})가 방전하여 스위치의 스트레스를 감소시키고, 1차측의 교류 입력 전류는 식 (1)의 기울기로 상승한다.

$$i_{in} = \frac{V_{in}}{L_{boost}} \quad (1)$$

2차측 전류는 C_a 로 형성되는 저 임피던스 경로를 통해 흐르며, nV_{dc} 만큼 충전되어 2차측 정류 다이오드의 전압 스트레스를 감소시킨다.

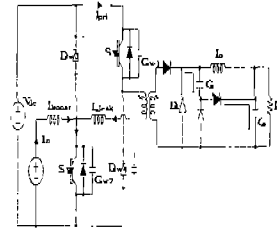


그림 3(a). 모드 1
Fig. 3(a) Mode 1

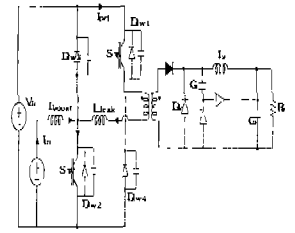


그림 3(b). 모드 2
Fig. 3(b) Mode 2

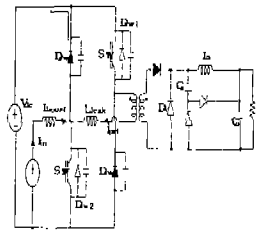


그림 3(c). 모드 3
Fig. 3(c) Mode 3

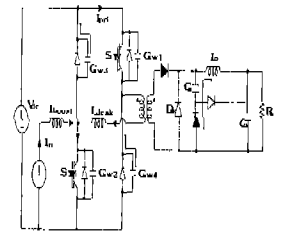


그림 3(d). 모드 4
Fig. 3(d) Mode 4

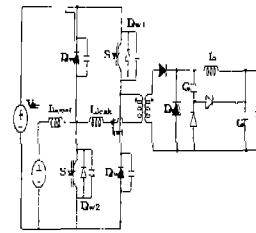


그림 3(e). 모드 5
Fig. 3(e) Mode 5

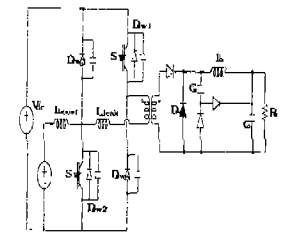


그림 3(f). 모드 6
Fig. 3(f) Mode 6

Mode 2 [$t_1 - t_2$]: 커패시터 C_a 가 완전히 충전이 되면, 1차측이 전 부하를 담당하고, 승압인덕터 (L_{boost})는 입력 전류 (i_{in})에 의해 에너지를 저장한다. 입력 전류 (i_{in})는 식 (2)에 따라 상승하고, 변압기 1차측의 전류는 식 (3)과 같다.

$$i_{in}(t) = i_{in}(t_1) + \frac{V_{in}}{L_{boost}}(t_2 - t_1) \quad (2)$$

$$i_{pri}(t) = i_{pri}(t_1) + \frac{V_{dc}}{L}(t_2 - t_1) \quad (3)$$

여기서, $L = L_{leak} + L_m$

L_{leak} : 변압기의 누설 인덕턴스

L_m : 변압기의 자화 인덕턴스

$i_{in}(t_1), i_{pri}(t_1)$: t_1 에서의 입력전류와 변압기 1차측 전류

Mode 3 [$t_2 - t_3$]: t_2 에서 스위치 (Sw_1, Sw_2)가 Turn-OFF 되면, 보조 회로의 커패시터 (C_a)가 방전하여 부하의 요구 전류를 충족시키고, 전압은 제로가 되어, 스위치 Turn-OFF 순간의 2차측 정류단 전압

스트레스를 감소시킨다. 스위치 (Sw_1, Sw_2)의 기생 커패시턴스는 V_{dc} 까지 전압을 충전하여 다음 스위칭 주기까지 유지되고, 1차측에 있는 환류 다이오드 (D_{sw3}, D_{sw4})의 기생 커패시턴스는 방전을 시작한다.

Mode 4 [t_3-t_4]: 스위치가 Turn-OFF 되면 교류 입력단에 흐르는 전류는 식 (4)의 기울기로 감소한다.

$$i_{in} = \frac{V_{dc} - v_{in}}{L} \quad (4)$$

변압기 1차측 전류가 감소하면 누설 인덕턴스에 저장되었던 에너지가 2차측 정류단을 통해 부하에 공급되고, 1차측은 환류 다이오드 (D_{sw3}, D_{sw4})를 통해 환류를 시작한다.

Mode 5 [t_4-t_5]: t_4 에서 교류 입력 전류는 완전히 제로가 된다. 이 구간은 t_2 까지 승압용 인덕터 L_{boost} 에 저장되었던 에너지가 벌크성 커패시터 (C_{dc})로 모두 전달되고 승압용 인덕터에 남아 있는 에너지가 없는 구간이다.

회로 설계시 이 구간이 다음 스위칭 시간이 되기 전에 오도록 설계하여야 전류 불연속 모드로 동작할 수 있고, 별도의 전류 제어기가 필요 없게 된다. 만약, 입력 전류가 다음 스위칭 순간까지 계속 흐르면, 전류 연속 모드로 동작하여 스위치 (Sw_1, Sw_2)의 영전류 Turn-ON이 불가능하다. 부하단은 누설 인덕턴스에서 전달된 에너지와 2차측 환류 다이오드 (D_w)를 통해 계속 에너지를 공급받는다.

Mode 6 [t_5-t_6]: 누설 인덕턴스에 의한 에너지가 모두 부하로 공급되고 나면, 변압기 1차측의 전류가 완전히 제로가 되어, 다음 스위칭 주기의 스위치 Sw_1, Sw_2 의 영전압 Turn-ON을 보장한다. 이 구간의 2차측은 환류 다이오드 (D_w)로 계속 환류한다.

t_6 에서 스위치에 게이트 신호를 인가하면 모드 1 부터 다시 반복한다.

III. 실험 결과

제안한 토폴라지의 타당성 검증을 위해서 입력전압 AC 110[V], 출력전압 DC 50[V], 스위칭 주파수 20[kHz], 1[kW]급의 부하에 대한 시작품을 제작하고 이의 실험 결과를 다음에 제시한다.

그림 4는 입력 전압과 전류의 파형을 나타내는데, 제안된 토폴라지가 전류제어기 없이도 단위 역률로 훌륭히 동작함을 보여준다.

그림 5는 입력전류를 확대한 파형이다. 입력 전류가 불연속이므로 매 주기마다 스위치는 영전류에서

Turn-ON이 가능하므로 스위치의 스트레스를 줄일 수 있다. 그리고, 전류가 제로인 구간이 존재하므로, 스위치의 Turn-ON시 입력단 정류기의 전류 스트레스가 감소되어 다이오드의 정격을 낮출 수 있는 장점을 가진다.

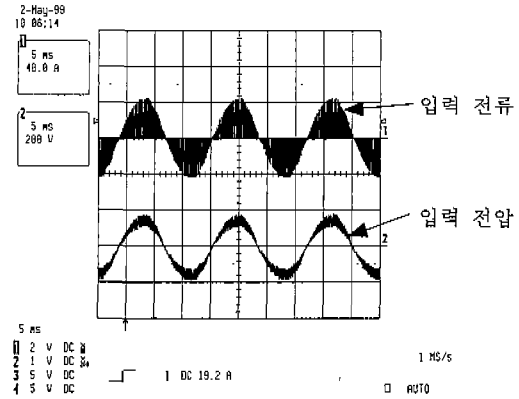


그림 4. 입력 전압과 전류
Fig. 4. Input voltage and current

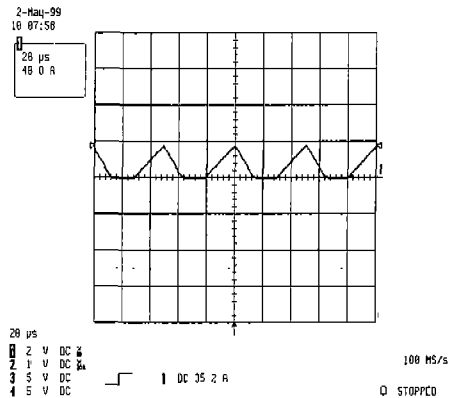


그림 5. 입력 전류 확대 (불연속 전류)
Fig. 5. Magnified Input current (DCM)

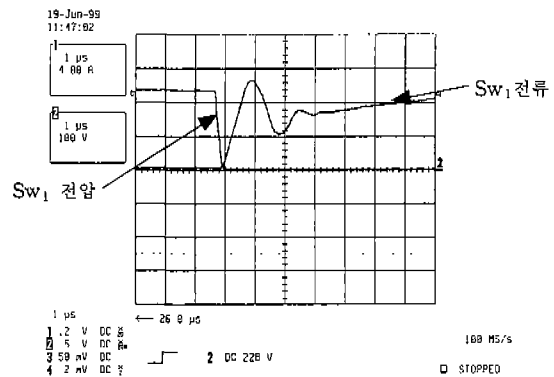


그림 6. Sw_1 의 영전압 스위칭
Fig 6. Zero-Voltage Switched Sw_1

그림 6과 7의 스위치 (Sw_1, Sw_2) 양단 전압과 전류 파형으로부터 스위치의 Turn-ON 시에 영전압 스위칭이 이루어짐을 확인할 수 있다.

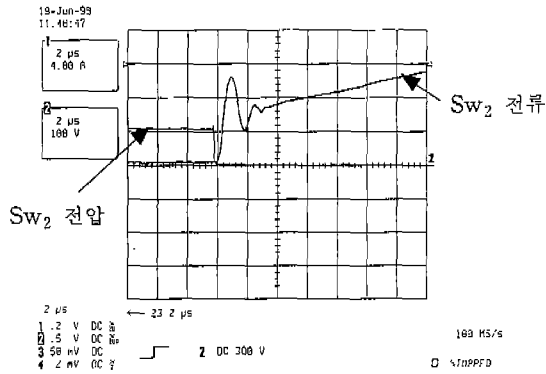


그림 7. Sw_2 의 영전압 스위칭
Fig 7. Zero-Voltage Switched Sw_2

그림 8과 9로부터 부가된 보조회로가 2차측 정류단의 Surge전압의 피크치를 상당히 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

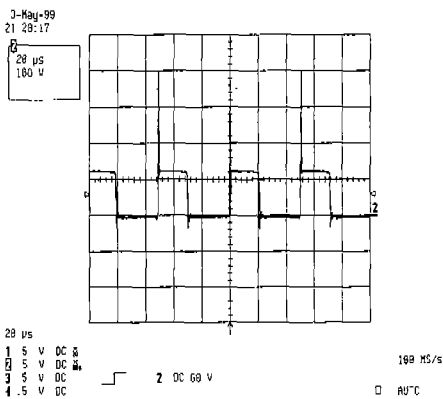


그림 8. 2차측 정류단 전압(보조회로가 없는 경우)
Fig 8. Rectifier voltage of secondary without an auxiliary circuit

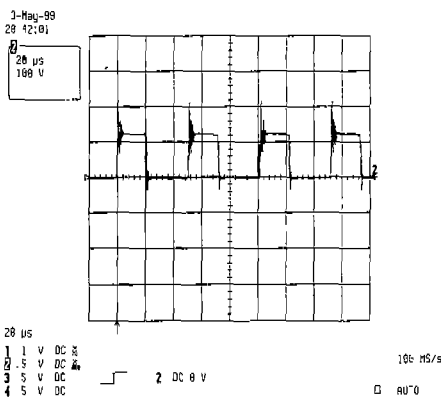


그림 9. 2차측 정류단 전압(보조회로가 있는 경우)
Fig 9. Rectifier voltage of secondary with an auxiliary circuit

위 실험에 사용된 회로정수는 표 1과 같다.

표 1. 회로 정수
Table 1. Specifications of the circuit

항 목	Value
입력 전압	110 [V]
스위칭 주파수	20 [kHz]
누설 인덕턴스	10 [μ H]
변압기 1차, 2차	900[uH], 150[uH]
승압용 인덕터	75 [uH]
출력 캐패시터	2200 [uF]
보조회로 커패시터	45 [nF]

IV. 결 론

본 논문에서는 역률 보상 회로(PFC)를 파워드 컨버터와 결합시킨 회로를 제안하고 모드별 동작 과정을 해석하였으며, 제안한 토폴라지의 타당성을 실험을 통하여 검증하였다.

역률 보상 회로와 DC/DC 컨버터를 하나로 합친 새로운 형태를 가지는 제안된 회로가 단위 역률로 훌륭히 동작하였으며, 각 스위치가 영전압에서 Turn-ON 되어 스위치의 스트레스가 감소됨을 확인하였다. 또한, 무손실 소자만으로 구성된 보조회로를 적용함으로써 2차측 정류단에 발생하는 Surge전압의 피크를 충분히 감소시켰다.

참 고 문 헌

- [1] M. van der Berg, J.A. Ferreira, "A Family of Low EMI, Unity Power Factor Converters", IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC), vol. II, June, 1996.
- [2] 임경내, "Single-Stage PFC AC/DC Full Bridge Converter의 소프트 스위칭에 관한 연구", 전력전자 학술대회논문집, pp.401-404, 1998,7.
- [3] L. Huber, M. Jovanovic, "Single-Stage, Single-Switch, Isolated Power Supply Technique with Input-Current Shaping and Fast Output-Voltage Regulation for Universal Input-Voltage-Range Applications", Applied Power Electronics Conference, Vol. I, 1997.
- [4] Y. Jiang, F.C. Lee, G. Hua, W. Tang, "A Novel single-phase power factor correction scheme" IEEE Applied Power Electronics Conf.(APEC) Proc., PP. 287-292, Mar. 1993.
- [5] J. Lazar, S. Cuk, "Open Loop Control of a Unity Power Factor, Discontinuous Conduction Mode Boost Rectifier", Intelec., 1995.