

공진형 보조 회로를 이용한 고역률 AC/DC 컨버터에 관한 연구

한대회\*, 김 용\*, 백수현\*, 배진용\*, 김필수\*\*  
 \*동국대학교 \*\*대림대학

A Study on the High Power-Factor AC/DC converter using Resonant Auxiliary Circuit

Dae-Hee Han\*, Yong Kim\*, Soo-Hyun Baek\*, Jin-Yong Bae\*, Pil-Soo Kim\*\*  
 \*Dongguk University, \*\*Daelim College

**Abstract** - A Single-Stage Single-Switch power-factor-correction(PFC) AC/DC Converter with universal input is presented in this paper. The PFC Converter can be achieved based upon the continuous current mode(CCM). The switch has less current and voltage stresses over a wide range of load variation so that a low voltage rating device can be used. The presented converter features high power factor high efficiency, and low cost. An 90W prototype was implemented to show that it has 70% efficiency with low voltage stress over universal line input.

1. 서 론

최근 선진국에서는 IEC1000-3-2와 같은 고조파 왜곡에 대한 규제가 강하게 대두되고 있다. 지난 몇 년간 이 규제를 만족시키기 위해서 역률 개선용 컨버터에 대한 연구가 많이 이루어져 왔다. 일반적으로 단상 역률보상 컨버터의 기본적인 토폴로지는 크게 이단(Two Stage) 방식과 단일(Single Stage) 방식 두 가지의 형태로 분류할 수 있다. 이단 방식은 두 개의 PWM 제어기(역률 개선용과 출력 전압 제어용)가 각 단마다 사용되며, 전형적인 이단 방식으로부터 소자의 수를 줄이고 효율을 개선시키기 위해서 다양한 단일 방식이 최근 제안되고 있다. 단일 방식은 하나의 전력단 안에 승압형 컨버터와 절연된 DC/DC 컨버터를 결합한 방식이다. 이런 방식의 컨버터 형태는 전형적인 PWM 제어기에 의해서 단일 스위치를 제어하므로 별도의 역률 보상을 위한 제어회로는 필요하지 않게 된다. 그러나 승압 인덕터 전류와 DC/DC 컨버터 전류가 중첩해서 단일 스위치를 통해 흐르므로 전도 손실과 스위칭 손실이 높게 된다.[1-7]

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 연속 전류 모드로 동작하는 S<sup>4</sup>(Single-Stage Single-Switch) -PFC 컨버터를 제안하고자 한다. 제안된 컨버터는 기존의 S<sup>4</sup>-PFC 컨버터와 비교하여 두 개의 공진 커패시터가 추가된 형태이며, 입력 전류의 실효치가 작으며, 노이즈에 강인하고, 역률 개선단 스위치의 전압 및 전류 스트레스가 증가하지 않는 장점을 가지고 있다.[1] 제안된 컨버터는 공진형 보조 회로를 사용하여 주 스위치가 넓은 부하 영역에 걸쳐 영전압 스위칭(ZVS)함으로써 고효율 특성을 나타내며, 동시에 승압 인덕터가 연속 전류 모드로 동작하면서 입력 전류의 역률을 개선하는 특징을 가지고 있다. 본 논문에서는 연속 전류 모드로 동작하는 S<sup>4</sup>-PFC의 동작원리, 해석 및 특성에 대하여 논하였으며, 90W급 시작품을 제작, 90kHz에서 실험하였다.

2. 본 론

2.1 기존의 S<sup>4</sup>-PFC 컨버터

그림 1은 기존의 S<sup>4</sup>-PFC 컨버터 회로를 나타낸다.[1-7] 기존의 컨버터는 하나의 스위칭 소자와 하나의 전압 제어 회로를 갖는다. 전압 제어 회로는 컨버터의 최종 출

력 전압을 제어하고, 역률 개선부를 위한 별도의 제어부는 존재하지 않는다. 일반적으로 역률 개선부는 불연속 전류 모드로 동작되게 하여 자동적으로 역률 개선이 이루어지게 한다. 이러한 모드로 동작되는 역률 개선 회로는 입력 전류가 순간 전압에 비례하는 특성을 갖게 되므로 별도의 제어 없이 자동적으로 역률 개선을 이룰 수 있다. 한편 기존의 S<sup>4</sup>-PFC 컨버터는 경 부하시의 직류 링크 전압이 중부하시의 직류 링크 전압보다 높은 단점을 가지고 있다. 경부하시 높은 직류 링크 전압은 불연속 전류 모드로 동작하는 역률 개선부와 연속 전류 모드로 동작하는 DC/DC 컨버터부 사이에 전력 불평형에 기인한다.[2][3][7]

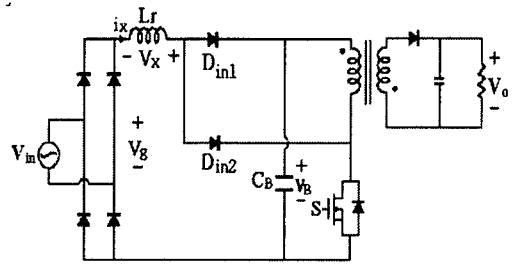


그림 1. 기존의 S<sup>4</sup>-PFC 컨버터 회로

그림 2는 역률 개선과 관계되는 입력 정류 전압, 승압 인덕터 전압·전류, 링크 커패시터 전압의 파형을 나타낸다.

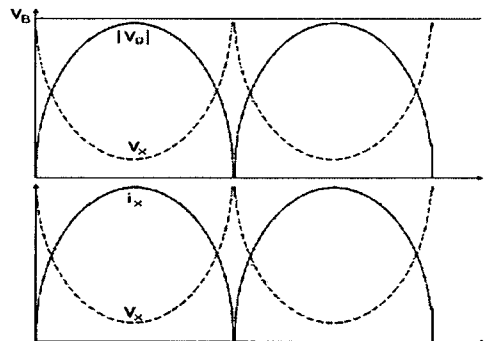


그림 2. 역률 개선부의 주요 파형

역률 개선을 하기 위해서는 승압 인덕터에 인가되는 전압(Vx)은 정현파 형태를 띄어야 한다. 따라서, 입력 순간 전압(|Vg|)이 0V를 교차하는 부근에서 승압 인덕터 전압(Vx)은 최대가 되고, 입력 순간 전압(|Vg|)이 최대일

때 인덕터 전압( $V_L$ )은 최소가 된다.[1]

### 2.2 제안된 S<sup>4</sup>-PFC 컨버터

그림 3은 제안된 S<sup>4</sup>-PFC 컨버터를 나타낸다. 기존의 불연속 모드로 동작하는 S<sup>4</sup>-PFC 컨버터 회로에 공진형 보조 회로를 추가하고, 인덕터 설계를 연속 모드로 동작하도록 하였다.[1] 그 결과 경부하에서 낮은 링크 전압 스트레스를 나타내었고, 스위칭 전류 스트레스를 저감하였으며, 링크 커패시터의 크기를 줄임으로써, 1차측 회로를 소형화 및 저가로 구성할 수 있다.

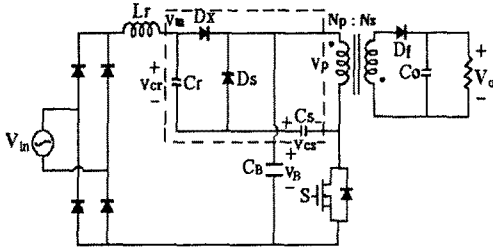


그림 3. 제안된 S<sup>4</sup>-PFC 컨버터 회로

제안된 컨버터에서 스위치 온 주기 동안, 입력 인덕터 ( $L_r$ )는 공진 인덕터와 같은 역할을 하게 되고, 공진 커패시터 ( $C_r, C_s$ )는 입력 인덕터 ( $L_r$ )와 공진을 통해서 에너지를 전달한다. 또한 공진 커패시터 ( $C_r, C_s$ )의 에너지는 링크 커패시터 ( $C_b$ )로 전송되거나, 스위치 오프시 변압기를 통하여 부하로 전달한다.

스위치의 오프 주기 동안, 변압기의 자화 인덕터는 공진 인덕터와 같은 역할을 하게 되며, 공진 커패시터 ( $C_r, C_s$ )와 공진을 통해서 부하로 전달하는 공진형 인덕터와 같은 역할을 한다. 따라서 제안된 컨버터는 공진형 컨버터 특성을 가지고 이와 같은 특성으로 에너지를 부하측으로 전달하고, 넓은 부하 영역에서 주 스위치가 영전압 스위칭(ZVS) 하는 장점을 가지고 있다.

### 2.3 이론적인 파형 및 동작 특성

그림 4와 그림 5는 공진형 보조 회로를 적용한 S<sup>4</sup>-PFC 컨버터의 모드별 동작 파형과 등가회로를 나타낸다.

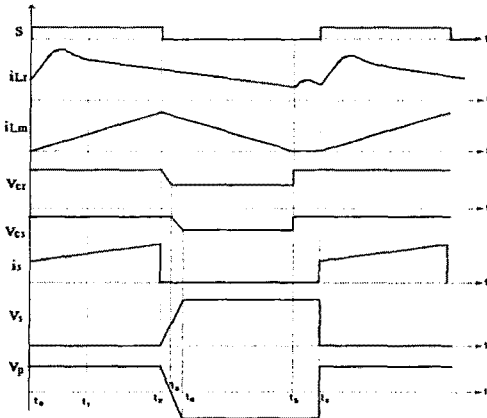


그림 4. 이론적인 회로 각부 파형

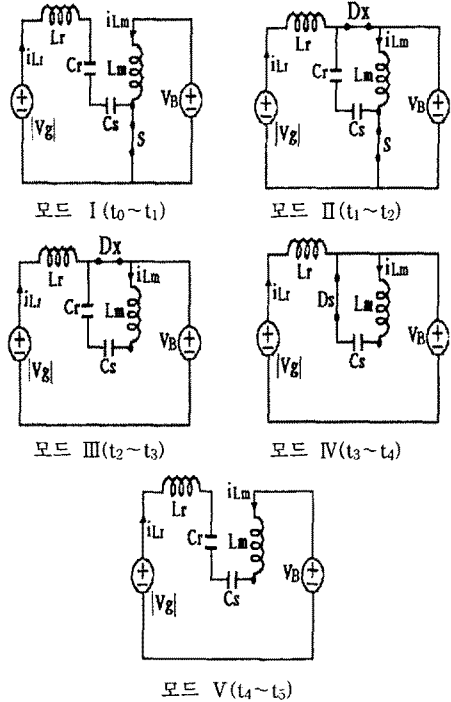


그림 5. 모드별 등가회로

모드별 정상상태 해석을 위해서 다음과 같이 가정한다.

- 1) 모든 소자는 이상적이다.
- 2) 스위치 양단의 리플 전압은 무시한다.
- 3) 스위치 소자 내부의 손실은 무시한다.
- 4) 다이오드에 의한 전압 강하와 리플은 무시한다.

#### 1) 모드 I : $t_0 \leq t \leq t_1$

스위치(S)는  $t_0$ 에서 턴온하며, 링크 커패시터( $C_b$ )에 인가되는 전압은 동시에 변압기의 1차측에 인가되고, 변압기의 자화 전류( $i_{Lm}$ )는 선형적으로 증가한다. 다이오드 ( $D_x$ )는 역전압이 걸리기 때문에 도통하지 않는다. 동시에 공진 인덕터( $L_r$ )와 공진 커패시터( $C_r, C_s$ )는 직렬 공진을 일으킨다. 송입 인덕터 전류( $i_{Lr}$ )는 그림 4와 같이 공진 형태로 증가한다. 공진 커패시터( $C_r, C_s$ )는 충전되며, 송입 인덕터( $L_r$ )는 에너지를 축적한다. 이 기간 동안, 송입 인덕터 전류와 DC/DC 컨버터 전류가 중첩해서 주 스위치를 통해 흐르게 된다. 주 다이오드( $D_x$ )는  $t_1$ 에서 도통하기 시작한다.

#### 2) 모드 II : $t_1 \leq t \leq t_2$

모드 II에서 주 다이오드( $D_x$ )가 도통하므로,  $V_m$ (송입 인덕터를 통과한 정류된 입력 전압)은 링크 전압( $V_b$ )에 도달하고, 송입 인덕터 전류( $i_{Lr}$ )는 주 다이오드를 통하여 흐르게 된다. 송입 인덕터( $L_r$ )에 축적된 에너지는 링크 커패시터( $C_b$ )로 전달되고, 링크 전압은 항상 선간 입력 전압보다 높으므로, 송입 인덕터의 전류( $i_{Lr}$ )는 선형적으로 감소한다.  $V_m$ 과 링크 커패시터 전압( $V_b$ )이 같으므로, 공진 커패시터( $C_r, C_s$ )로 전류가 흐르지 않기 때문에 전위는 변화가 없다. 동시에 주 스위치(S)는 DC/DC 컨버터의 전류에만 영향을 받는다. 따라서 컨버터는 고효율 특성을 나타내게 된다.

#### 3) 모드 III, IV : $t_2 \leq t \leq t_4$

주 스위치(S)는  $t_2$ 에서 턴오프 되며, 자화 전류( $i_{Lm}$ )와 입력 인덕터 전류( $i_{Lr}$ )의 차이는 공진 커패시터( $C_r, C_s$ )

를 방전시키는 역할을 하고, 변압기의 자화 전류( $i_{Lm}$ )는 계속적으로 증가한다. 이 모드 동안 공진 커패시터( $C_r$ ,  $C_s$ )는 방전되고, 보조 다이오드( $D_s$ )는 도통하기 시작하며, 링크 커패시터( $C_B$ )는 계속해서 방전한다. 따라서 공진 커패시터( $C_r$ ,  $C_s$ )에 축적된 에너지는 변압기를 통하여 출력측으로 전달된다. 이 때 변압기 1차측 전압은 링크 커패시터( $C_B$ )에 걸리는 전압과 같아진다. 출력 정류기( $D$ )는  $t_4$ 에서 도통된다. 이 기간동안, 변압기의 자화 전류( $i_{Lm}$ )는 전류원으로 가정할 수 있고 선형적으로 감소한다.

4) 모드 V :  $t_4 \leq t \leq t_5$

출력 정류기( $D$ )는  $t_4$ 에서 도통되며, 변압기의 자화 에너지는 출력측으로 전달되고, 동시에 자화 전류( $i_{Lm}$ )는 선형적으로 감소한다. 링크 커패시터( $C_B$ )에 인가되는 전압은 이 모드동안에 출력측에서 반영된 전압에 의해 감소된다.  $t_5$ 에서, 자화 전류는 0이 되고, 이 모드는 종료된다.

2.4 실험 결과

제안된 방식의 타당성을 검증하기 위해 90kHz, 90W 급의 컨버터를 제작하여 실험하였다.

표 1은 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터 값을 나타낸다.

표1. 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터

입력전압 ( $V_{in}$ )	110 V
출력전압 ( $V_o$ )	15 V
승압인덕터 ( $L_r$ )	577 $\mu$ H
공진 커패시터 ( $C_r$ )	4.7 nF
공진 커패시터 ( $C_s$ )	1 nF
주 변압기	TDK PC 40 PQ 3020 43T : 5T Llk = 8 $\mu$ H
주 스위치(S)	APT 8030L, A.P.T.
주 다이오드( $D_x$ )	DSEI 30, IXYS
출력다이오드( $D_f$ )	F20L60U
스위칭주파수( $f_s$ )	90 kHz

그림 6은 50%의 부하에 대한, 승압 인덕터( $L_r$ ) 전류와 주 스위치(S)의 전압 파형을 나타낸다. 승압 인덕터 전류( $i_{Lr}$ )는 연속 모드로 동작하므로, 전류의 실효치가 작으며, 노이즈에 강인한 특성을 나타낸다. 동시에, 공진 특성을 보이고 있다. 주 스위치에 연속적으로 인가되는 전압은 정현파에 근사하게 됨을 알 수 있다

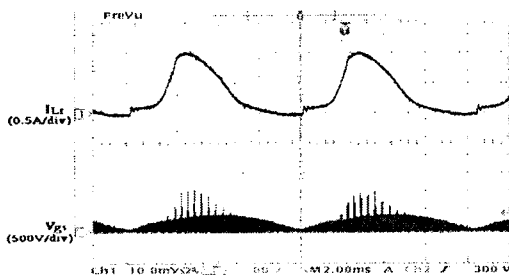


그림 6. 승압 인덕터 전류 파형 및 주 스위치 전압 파형

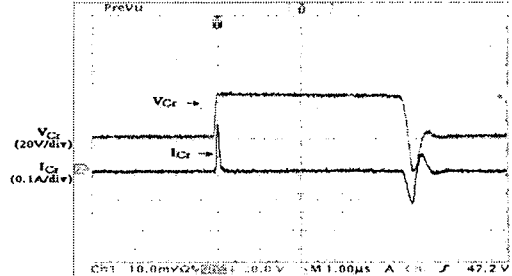


그림 7. 공진커패시터( $C_r$ )에 걸리는 전압·전류파형

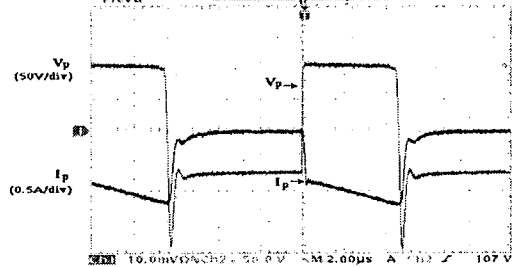


그림 8. 변압기 전압·전류 파형

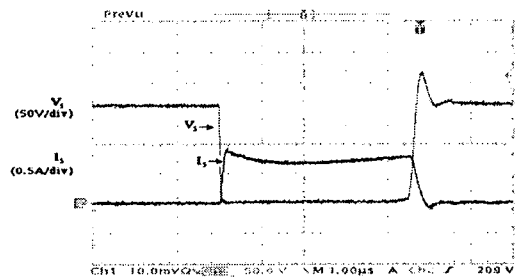


그림 9. 주 스위치 전압·전류 파형

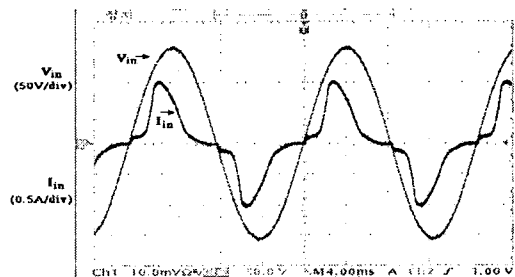


그림 10. 입력 전압·전류파형

그림 7은 공진 커패시터( $C_r$ )에 인가된 전압 및 전류파형을 나타낸다. 공진 커패시터( $C_r$ )와 승압 인덕터( $L_r$ )는 공진을 일으키며, 주 스위치의 영전압 스위칭(ZVS)에 영향을 준다.

그림 8은 변압기의 전압 및 전류 파형을 나타낸다. 변압기의 자화 인덕터( $L_m$ )는 주 스위치(S)의 턴온시 에너지를 축적하고, 턴 오프시 출력측으로 에너지를 전달한다.

그림 9는 주 스위치(S)의 전압 및 전류 파형을 나타낸다. 주 스위치가 공진 커패시터( $C_r$ )의 영향으로 인해서 넓은 부하 범위에서 영전압 스위칭(ZVS)을 함으로써

스위칭손실을 저감할 수 있으며, 동시에 고효율 컨버터

를 구현할 수 있다. 여기서 공진 커패시터( $C_r$ )은 스너버의 역할도 함을 알 수 있다.

그림 10은 입력 선간 전압이 110V이며, 50%부하에서 입력 전압 및 전류 파형을 나타낸다. 제안된 컨버터는 전류 연속모드로 동작되며, 입력 역률은 0.9로 동작한다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 110V<sub>rms</sub> 입력의 연속 전류모드로 동작하는 단일 전력단 고역률 컨버터를 제안하였다. 또한 제안된 회로에 대해 실험을 수행하여 제안된 회로의 타당성을 확인하였다. 제안된 컨버터는 기존의 불연속 전류모드와 달리 연속 전류 모드로 동작하도록 하였으며, 기존의 불연속 모드에서의 단점인 높은 링크 전압과 스위치의 전류 스트레스를 저감함으로써 스위치 손실을 줄일 수 있었다. 또한 링크 커패시터의 크기를 감소함에 따라 입력단의 크기를 줄일 수 있었으며, 그 결과 소형화와 제작비용의 절감을 기대할 수 있으며, 50%부하에서도 0.9의 역률로 제어되는 것을 확인할 수 있었다. 일반적인 S<sup>4</sup>-PFC 컨버터는 비교적 낮은 효율을 나타내지만, 제안된 S<sup>4</sup>-PFC 컨버터는 75%이상의 고효율 특성을 나타내고 있다. 또한 제안된 컨버터는 입력단 인덕터가 연속전류 모드로 동작함으로써 입력전류의 실효치가 작으며, 노이즈에 강인한 특성을 가지고 있으며, 동시에 소용량, 고효율 전력 변환 장치에 많은 적용이 가능하리라 판단된다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] J. Qian, F. C. Lee, and T. Yamauchi, "Current source charge pump high power factor electronic ballast," in IEEE Power Electronics Specialists Conf., pp. 66~72,
- [2] M. Madigan, R. Erickson, and E. Ismail, "Integrated high quality rectifier regulators," in IEEE Power Electronics Specialists Conf., pp.1043~1051, 1992
- [3] M. Maechara, "Inverter device for stable, high power factor input current supply," U.S. Patent in IEEE Power Electronics Specialists Conf., pp.527~540
- [4] J. Qian and F. C. Lee, "A novel high power factor ac/dc converter with a coupling inductor," in Virginia Power Electronics Seminar, pp.1~7, 1996
- [5] I. Takahashi and R. Y. Igarashi, "A switching power supply of 99% power factor by the diode rectifier," in IEEE Int. Telecommunications Energy Conf., pp. 714~719,
- [6] J. Qian, F. C. Lee, "A High Efficiency Single-Stage Single-Switch High-Power-Factor AC/DC Converter with Universal Input", in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 13, No. 4, pp.699~705, 1998
- [7] 김학원, 문건우, 조관열, 윤명중 "90 260V<sub>rms</sub> 입력 범위를 갖는 단일 전력단 고역률 컨버터," 전력전자 학회 논문지, pp.18-29, 2002년 2월
- [8] 배진용, 김용외, "능동 클램프 방식을 이용한 ZVT 승압형 컨버터의 평균전류모드 제어에 관한 연구", 대한전기학회, 하계 학술대회 논문집, pp. 1005~1008, 2001