

단상 고역률 PWM 승압형 정류기의 특성해석

\*김주용, 문상필, 서기영, 김영문\*\*, 김해제\*\*  
경남대학교, 마산대학\*\*

Characteristics analysis of single-phase high power factor PWM boost rectifier

\*J. Y. Kim, S. P. Mun, K. Y. Suh, Y. M. Kim\*\*, H. J. Kim\*\*  
Kyungnam University, Masan College\*\*

**Abstract** - This paper presents a single phase high power factor PWM boost rectifier featuring soft commutation of the active switches at zero current. It incorporates the most desirable properties of conventional PWM and soft switching resonant techniques. The input current shaping is achieved with average current mode control and continuous inductor current mode. This new PWM converter provides zero current turn on and turn off of the active switches, and it is suitable for high power applications employing IGBT's. The principle of operation, the theoretical analysis, a design example, and experimental results from a laboratory prototype rated at 1.6[kW] with 400[Vdc] output voltage are presented. The measured efficiency and the power factor were 96.2[%] and 0.99[%], respectively, with an input current THD equal to 3.94[%], for an input voltage with THD equal to 3.8[%], at rated load.

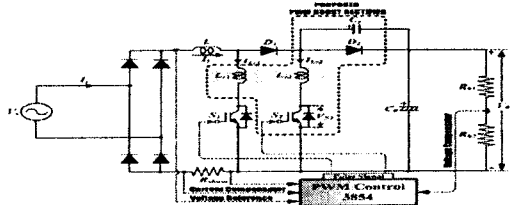
1. 서 론

산업용, 가정용의 전기기기 등에 광범위하게 사용되어지고 있는 직류전원은 다이오드 정류기가 널리 이용되어지고 있다. 일반적으로 다이오드 정류기는 회로구성이 용이하면서 가격이 저렴하지만 입력전류에 포함되어진 고조파 성분이 많이 발생하는 단점이 있다. 이러한 입력측에 발생하는 고조파 성분을 저감하기 위해서 입력측에 매우 큰 리액터를 사용하지만 가격이 상승하고, 장치 전체의 무게가 크게 되며, 입력 전압 역률이 나빠진다. 최근 이러한 문제점들을 해결하는 고역률 컨버터가 많이 이용되어지고 있다. 고역률 컨버터는 인버터의 회로구성을 이용하는 것과 다이오드 정류 회로에 초퍼를 접속한 것이 있다. 이 중에서 다이오드 정류회로에 초퍼를 접속한 것은 초퍼의 분류와 동일하므로 승압형, 강압형, 승-강압형으로 분류되어진다. 본 논문에서는 1[kW]급 이상 고전력 응용분야에서 일반적으로 사용되어지는 반도체 스위치인 MOSFET 대신에 IGBT를 사용한 단상 고역률 PWM 승압형 정류기의 새로운 토폴로지를 제안하여 특성 및 동작원리와 기존의 승압형 정류기와 손실을 비교, 분석하여 설명하고자 한다. 그리고 효율은 증가시키면서 평균전류를 조절하는 방법을 서술하고자 한다.

2. 제안한 단상 고역률 승압형 정류기

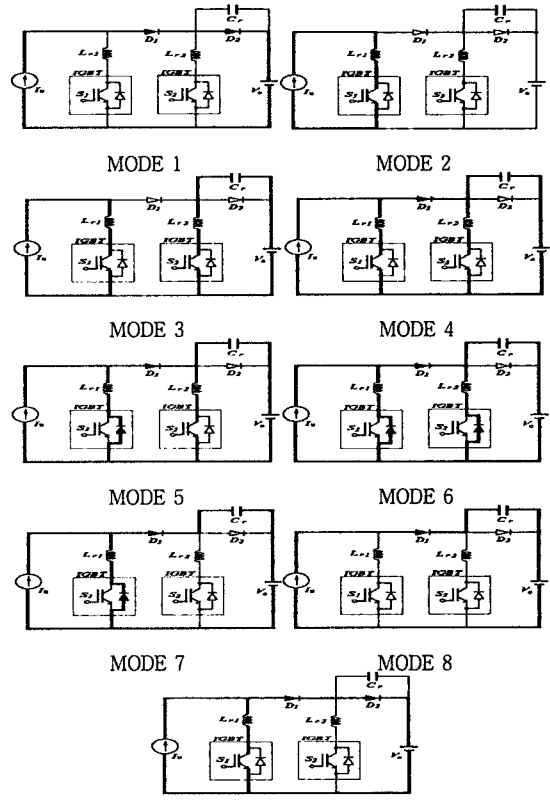
그림 1은 제안한 단상 고역률 PWM 승압형 정류기를 나타낸 것이다. 그림 1에서 제안한 회로는 주 스위치  $S_1$ 과 보조스위치  $S_2$ , 다이오드  $D_1$ ,  $D_2$  두 개의 작은 공진 인덕터  $L_{r1}$ 과  $L_{r2}$ , 한 개의 공진 커패시터  $C_r$ 로 구성되어지며, 동작 해석은 다음과 같이 상태에서 해석한다.

첫째로, 모든 구성요소들은 이상적이며, 컨버터는 고정 스위치 주파수에서 안전상태에서 동작된다. 둘째로, 입력전압은 사인파이고, 출력전압은 일정하며, 입력 필터로 총 스위칭주파수(T)동안 전류원  $I_s$ 으로써 매우 충분해야 한다.

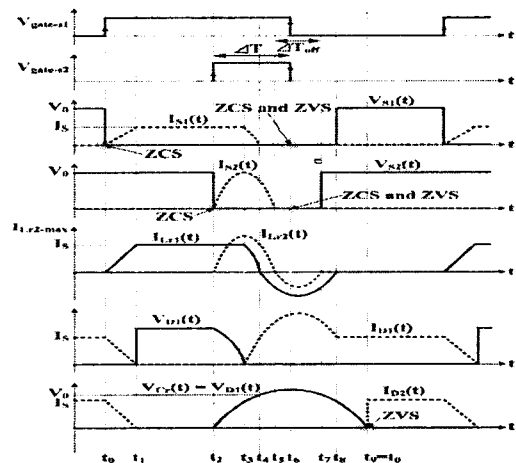


〈그림 1〉 단상 고역률 ZCS PWM 승압형 정류기의 주 회로

그림 2(a)는 제안한 회로의 정류상태를 나타낸 것이며, 그림 2(b)는 한 주기 동안의 각부의 이상적인 파형을 나타낸 것이다. 그림 2에서 나타낸 것처럼, 주 스위치  $S_1$ 은  $t=t_0$ 에서 ZCS가 실현되며, 보조 스위치  $S_2$ 는  $t=t_2$ 에서 ZCS가 실현된다. 그리고  $\Delta t_6 = t_6 - t_2$  시간 간격  $\Delta T$  동안 두 스위치는 영전류와 영전압으로 동시에 오프되며, 다이오드  $D_1$ 과  $D_2$ 가 ZVS상태로 소프트 정류되고, 시간간격은 공진 파라메타와 출력전력에 의존하며, 식 1과 같으며, 스위치  $S_1$ 과  $S_2$ 가 턴-오프하기 위한 시간간격  $\Delta t_{off}$ 는 식 2와 같이 나타낼 수 있다. 그리고 식 1과 식 2에서 특정 파라메타값의 독립방정식과 동작해석을 위한 파라메타  $\alpha$ ,  $\beta$ 를 설정하였다.



MODE 9  
(a) 모드 해석



(b) 각 부의 동작 파형

〈그림 2〉 제안한 정류기의 모드 해석 및 각부의 동작 파형

$$\Delta T = \frac{1}{\omega_{02}} \left[ \frac{\pi \sqrt{1+\beta}}{2} + 2\pi - \arccos(-\beta) \right] - \frac{\Delta t_{off}}{2} \quad (1)$$

$$= \frac{1}{\omega_{01}} \left[ \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{\sqrt{1+\beta}} \right]$$

$$\Delta t_{off} = \Delta t_6 = \frac{1}{\omega_{01}} \left\{ \frac{2[\pi - \arccos(-B)]}{\sqrt{1+\beta}} \right\} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \omega &= \frac{1}{\sqrt{L_2 C_r}} = \omega_{01} \sqrt{1+\beta} \\ \alpha &= \frac{I_s(t)}{V_o} \sqrt{\frac{L_2}{C_r}} \\ \beta &= \frac{L_2}{L_1} \end{aligned}$$

제안한 새로운 고역률 PWM 승압형 정류기의 설계하는 순서와 공식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

첫째로, 입력과 출력의 조건에 필요한 값을 정리한다.

$$\begin{aligned} \text{입력전압 } V_{s(s)} &= 220[V] \\ \text{최소입력전류 } V_{s(s)\min} &= 187[V] \\ \text{출력전압 } V_o &= 400[V] \\ \text{출력전력 } P_{out} &= 1600[W] \end{aligned}$$

$$\text{효율 } \eta = 0.95, \text{ 스위칭 주파수 } f_s = 20[\text{kHz}]$$

둘째로, 최대 입력 전류값( $I_{sp}$ )을 다음과 같은 식에 의해서 구할 수 있다.

$$I_{sp} = \frac{\sqrt{2} P_{out}}{\eta V_{s(s)\min}} = \frac{\sqrt{2} \times 1600[W]}{0.95 \times 187[V]} \approx 12.74[A]$$

셋째로, 공진 파라메타의 영향을 최소화하고 능동스위치 S1과 S2에서 ZCS에서 소프트 정류를 얻기 위해서 다음과 같은 식을 이용하여 구하였다.

$$\beta = \frac{L_2}{L_1} = \frac{28[\mu\text{H}]}{46.6[\mu\text{H}]} \approx 0.6 (\because \beta < 1)$$

$$\alpha_{\max} = \frac{I_s(\text{peak})}{V_o} \sqrt{\frac{L_2}{C_r}} = \frac{12.74[A]}{400[V]} \sqrt{\frac{28[\mu\text{H}]}{94[\mu\text{F}]} } \approx 0.55$$

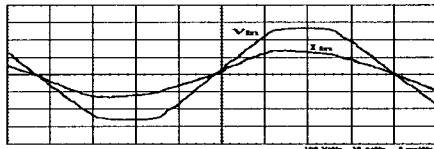
$$(\because \alpha_{\max} < \beta)$$

넷째로, 보조 스위치의 조절을 위한 시간간격  $\Delta T$ 는 식 (1)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta T \approx 7.7[\mu\text{s}]$$

다섯째로, 승압형 입력 인덕턴스  $L$ 와 출력 커패시턴스  $C_o$ 는 2[%]보다 낮은 출력 리플전압을 얻기 위한 다음과 같은 값으로 하였다.

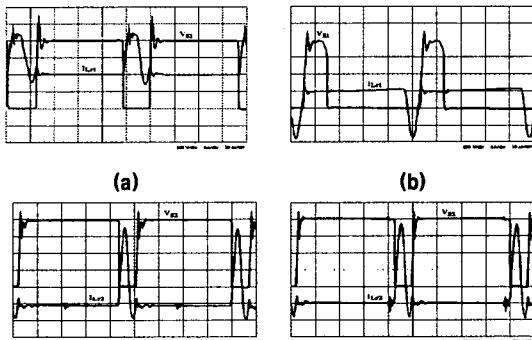
$$L = 1.9[m\text{H}], C_o = 680[\mu\text{F}]$$



〈그림 3〉 입력전압과 전류

그림 3은 제안한 회로의 입력전압과 전류의 실험파형 나타낸 것이다. 그림 3에서 역률은 실질적으로 전 부하에서 0.99에 가깝고, 입력전류 THD는 3.94[%]와 같으며, 입력전압 THD는 3.8[%] 정도라는 것을 알 수 있다.

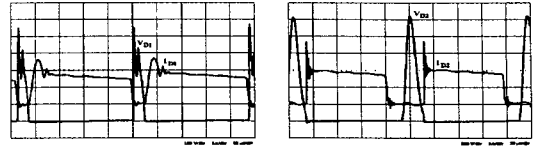
그림 4는  $V_s(t) = 0$ (a)-(c)와  $V_s(t) = V_p$ (b)-(d)일 때 주스위치  $S_1$  (a)-(b)와 보조스위치  $S_2$  (c)-(d)의 전압파형과 공진 인덕터  $L_1$ 의 전류 파형을 나타낸 것이다. 그림 5는 전 부하에서의 다이오드  $D_1$ 과  $D_2$ 의 전압과 전류의 파형을 나타내었다. 그림 4, 5에서 ZCS는 두 개의 능동 스위치의 일정주파수에서 얻을 수 있고, 다이오드  $D_1$ 과  $D_2$ 는 ZVS 상태에서 소프트 하게 정류된다는 것을 알 수 있다.



(c) (d) 〈그림 4〉 각부의 실험 파형

그림 4에서 시간  $\Delta T$ 는 스위칭주기의 일부분에 지나지 않는다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 다이오드에서 발생되어지는 전압스트레스 장애는 접합 커패시턴스와 역회복전류 사이의 상호작용에 의해서 발생되는데 이 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 그림 5(a)에서 보여진 것처럼 저 회복 저장 충전을 가진 600[V] 초고속 다이오드를 사용함으로써 EMI/RFI 노이즈를

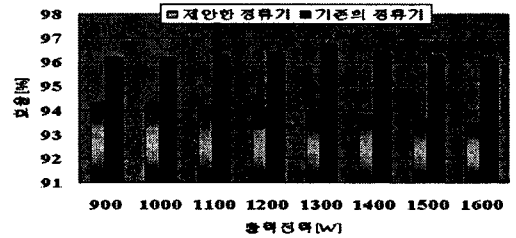
개선시켜 최소화시킬 수 있다. 그림 5(b)에서 나타낸 것처럼 전압 스트레스는 몇몇의 고전압 초고속 다이오드에서 간접적으로 도통손실이 증가되어 높은 순방향 전압이 나타나므로 실제실험에서는 보다 나은 동작을 위해서 다이오드 D2를(BYP100-Siemens, 1000[V], 낮은 순방향전압-VF(typ)=1.75[V], 55[ns] 초고속 소프트회복)사용하였다.



(a) (b) 〈그림 5〉 다이오드 D1과 D2의 전압과 전류의 실험 파형

〈표 1〉 정류기의 손실 해석

구성	기존의 승압형 정류기		제안한 승압형 정류기	
	전도	스위칭	전도	스위칭
S1	15.6W	49W	13.3W	-0
S2	-	-	3.7W	-0
D1	7.4W	3.3W	9.0W	-0
D2	-	-	7.3W	-0
D3	-	-	1.1W	-0
D4	-	-	0.1W	-0
기타	28.7W		26.3W	
전체	104W		60.8W	
효율	93.5%		96.2%	



〈그림 6〉 정류기의 효율 해석

표 1은 입력 전압 220[Vrms]/60[Hz]과 1.6[kW]급 출력전압에서 새로운 고역률 PWM 승압형 정류기와 기존의 하드 스위칭 승압형 정류기의 손실을 비교한 것이다. 표 1에서 기존의 하드 스위칭 승압형 정류기에서 발생되어지는 전체 전력손실은 스위칭의 손실인 것을 알 수 있으며, 새로운 고역률 PWM 승압형 정류기의 보조구성요소에서 부가되어지는 전력손실이 일반 출력전력의 0.8[%]보다 낮은 결과를 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 6은 제안한 고역률 PWM 승압형 정류기와 같은 기능을 가진 기존의 하드스위칭 PWM 승압형 정류기의 출력에 대한 효율 특성을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 6에서 제안한 정류기의 부하단에서 측정된 효율이 기존의 정류기의 효율보다 2.7[%]향상되는 것을 알 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서 단상 고역률 ZCS PWM 승압형 정류기에서 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

- 첫째로, 제안한 고역률 정류기는 폭넓은 부하와 입력전압범 위에서 평균 전류 조절을 통해 얻어지며, 입력전류의 THD가 저감되어 IEC-555-2규정에 만족할 수 있었다.
- 둘째로, 무부하상태에서 전부하상태까지 능동 스위치와 다이오드는 영전류 소프트 정류가 가능하였다.
- 셋째로, 역바이어스 안정동작영역(RBSOA)스트레스를 완화시킴으로써 IGBT의 턴-오프시 발생되어지는 래칭현상을 억제하였다.
- 넷째로, 낮은 도통 손실은 부하에 직렬로 다이오드를 추가함에도 불구하고 낮게 나타났다.
- 다섯째로, 폭넓은 부하에서 96[%]이상의 효율을 나타내며, 방열판을 부착함으로써 더욱 증가시킬 수 있다.

### 〔참 고 문 헌〕

- [1] H. Nakano : "Improvement Effect of Input Current of Boost Type One Main Switching Element Rectifier without Using Feed Back Control", T. IEE, Vol.115-D, No.5, pp.562-569, 1995.
- [2] M. Matsubara: "Study on AC Line LC Filter in Boost Type Rectifier with Single Switching Device", T. IEE, Vol.120-D, No.7, pp.870-876, 2000.
- [3] R. Streit and D. Tollik, "High efficiency telcom rectifier using an novel soft-switched boost-based input current shaper," in Proc. INTELEC Rec., pp, 720-726, 1991