

Free Voltage Regulation기능을 갖는 교환기용정류기 개발에 관한 연구

김은수, *조기연, *임근희, *김요희, **홍성철
* 한국전기연구소, **수영전기기업(주)

A Study on the Development of A Rectifier Unit for Telecommunication Equipments with Free Input-Voltage Regulations

Eun-Soo Kim, **Kee-Yeon Joe, *Geun-Hie Rim, *Yo-Hee Kim, ** Sung-Chul Hong
* KERI, **SU-YOUNG Elec- co, LTD

ABSTRACT

This paper deals with a 3 ϕ rectifier unit for telecommunication system. The rectifier unit is developed to cope with the step-up of the AC input voltatage from 220V to 380V.

By using a buck-type converter in the front-end, it keeps the input power factor high and reduces the voltage ripple in the dc output. It also has a very wide voltage regulation range, which lets the unit be applied for both the 220V and 380V input system.

The study includes the power conversion scheme, control strategy, snubber circuit and finally, experimental results

이러한 스위칭에 따른 surge는 스위칭소자의 급격한 임피던스 변화에 관계하고, 스위칭소자 IGBT내의 기생 capacitance는 스위치 off시 높은 임피던스를 나타내어 전압 스트레스를 발생시킨다. 따라서 입력전압에 관계없이 넓은 부하조건에서도 영전압 스위칭조건을 만족하고 스위칭손실이 적고 전원이나 부하로 스위칭에너지를 회생할 수 있는 무손실 스너버를 적극 고려할 필요성이 있었다.

본 연구에서는 충전된 스위칭 에너지를 부하쪽으로 회생할 수 있는 Energy Recovery Snubber 방식을 적용하였다.

1. 서론

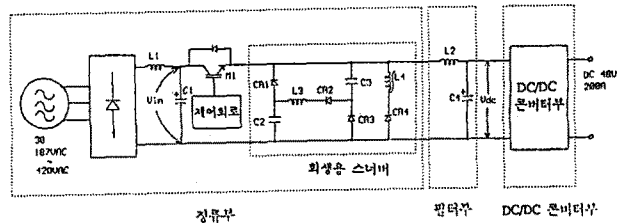
통신용 전원장치의 기본구성은 교류상용전원을 직류로 변환시키는 정류부, 축전지, 승압콘버터 및 인버터부로 구성되는데 입력전원의 변동에 대한 대응은 축전지 전단인 정류부에서 이루어진다. 이 정류부도 크게 AC/DC와 DC/DC의 2단계 변환을 통해 축전지 요구전압인 48V로 regulation되는데 용량이 큰 경우는 주로 reliability가 높은 thyristor를 AC/DC변환부에 사용하고 DC/DC측에는 PWM이나 resonant형의 콘버터를 사용한다. 이러한 system구성은 입력전원변동이 10%내의일 경우에는 크게 문제되지 않지만, 380V로 승압하는 과정에 있는 국내 전화국이나 입력전압이 다른 외국에 수출용으로 제작되는 전원장치에서는 입력전압범위가 광범위하여 thyristor형의 콘버터를 사용하기에는 과도한 무효전력과 직류출력전압의 고주파 ripple증가등의 문제를 야기시킨다.

본 연구에서는 이러한 문제점들을 인식하고 buck type의 콘버터를 전반부에 도입하여 정류기의 입력력률개선은 물론 free input voltage regulation 기능을 갖도록 했다.

2. 3 ϕ AC 입력 PWM BUCK 콘버터

정류기에 3 ϕ AC 380V의 전압이 PWM Buck 콘버터에 입력되면 Buck 콘버터의 Main IGBT 스위칭시 급격한 전압변화에 따라 큰 Surge 전압이 발생한다.

또 Buck 콘버터의 freewheeling 다이오드의 역회복 특성에 따른 단락전류도 문제가 된다.



정류부

필터부

DC/DC 콘버터부

$L_1: 7.5\text{mH}$, $C_1: 4400\mu\text{F}$, $C_2, C_3: 0.05\mu\text{F}$
 $L_2: 300\mu\text{H}$, $C_4: 500\mu\text{F}$

그림 1. Free voltage regulation 기능을 갖는
교환기용 정류기 주회로도

2.1 Energy recovery snubber를 갖는 Buck 콘버터 주회로

Energy recovery 무손실 스너버는 그림2에서처럼 resonant silicon controlled rectifier (SCR) commutation 기술에 근거하고 있다.

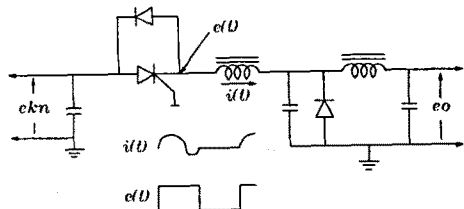


그림 2. Resonant Buck Regulator

이 buck regulator SCR회로는 power TR 또는 IGBT로도 적용될 수 있고, 스위칭 손실은 active device에서도 저감시킬 수 있지만 resonant inductor가 크고, 소음이 있으며 손실이 크다. 또한 경부하에서도 공진전압전류값이 최대 출력을 넘는 문제가 있다.

이런 문제를 해결하기 위해 그림 1에 나타난 것처럼 부가적인 다이오드와 capacitor에 따라 공진전류크기의 저감과 향상된 효율을 낼 수 있는 출력에너지의 부분공진을 이용한 energy recovery snubber를 Buck 컨버터에 적용했다.

그림 3에서의 같이 부분공진 energy recovery snubber는 직렬공진(L-C)회로에 step응답을 주었을때의 capacitor 전압과 전류에 대한 응답특성으로부터 쉽게 이해될 수 있다.

$$i = \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot E \cdot \sin \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot t \quad \dots (1)$$

$$V_c = \frac{1}{C} \int i dt = -E \cos \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot t \quad \dots (2)$$

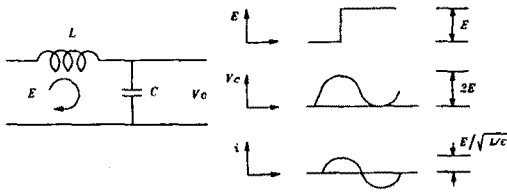


그림 3. L-C 회로의 Step 응답

1), 2)식에서처럼 각각의 수동소자 (L 또는 C)에 걸리는 전압은 입력 step의 두배의 peak-to-peak값을 가지고 공진하고, 전류가 0일때 전압은 peak가 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 그림 1에 나타난 부분공진 스너버는 다음 mechanism에 의해서 동작한다는 것을 알 수 있다. 다이오드 CR1이 초기에 역바이어스되어 있고 모든 초기조건이 zero라고 가정하고, 주 스위치소자가 turn-on했을때 step 입력전압 Vin이 회로에 인가되면 C3-L3-C2를 통해서 충전하기 시작하고, C2가 C3보다 약간 적다고 한다면 C2의 전압은 전류가 reverse되기 전에 입력전압을 초과하게 되므로 다이오드 CR1이 도전하여 새로운 공진회로 L3-C3가 형성되지만 인덕터 L3는 다이오드 CR2에 의해 역바이어스 되어있기 때문에 C2, C3는 각각 입력전압 Vin으로 분담 충전되어 다음 Turn-off전이 때까지 Reset 된다.

주 스위치 소자(IGBT)가 Turn-off되었을때 capacitor C2와 C3방전에 의해 Turn-off Surge 전압이 완전히 억제된다는 것을 알 수 있다.

이에 대한 시뮬레이션 파형을 그림 4에 나타냈다.

스너버 설계 및 실험시 다음 제약조건을 고려해야 한다.

- C2와 C3는 turn-off surge 전압을 억제하기 위해 충분해야 한다.

- Snubber capacitor 방전시간은 turn-off surge 전압이 억제될 최소 duty cycle의 펄스폭보다 적어야 한다.

$$[C_2 \text{와 } C_3 \text{가 같다면 } t = \pi \sqrt{L(C_2 + C_3)}]$$

- 최대입력전압에 있어서 turn-on시 부하전류에 부가된 peak 공진전류는 buck 컨버터 주 스위치소자의 정격을 초과하게 되므로 C2를 증가시키는데에는 이 제한에 의해 억제되어야 한다.

이와 같이 energy recovery snubber 적용에 따른 실험결과를 그림 5와 그림 6에 나타냈다.

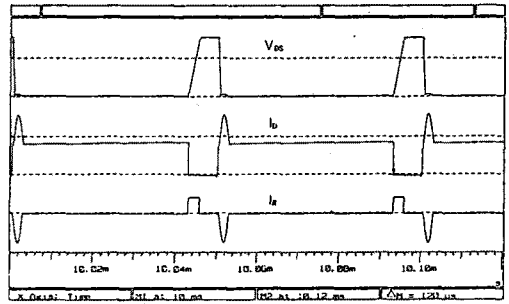
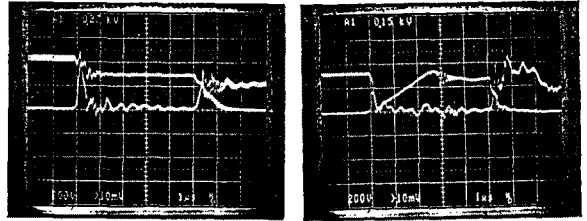


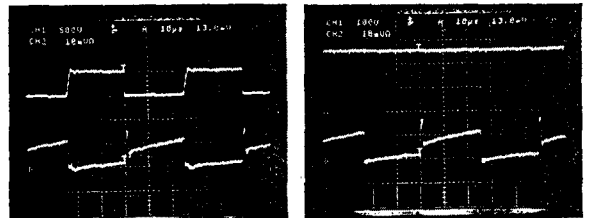
그림 4. Energy recovery snubber를 갖는 buck컨버터의 각부 파형 (200V/DIV, 50A/DIV)



a) RCD snubber 적용시 IGBT 양단간 전압 및 전류파형 (200V/DIV, 20A/DIV)

b) Buck 컨버터 출력전압 및 IGBT 입력전류 파형 (100V/DIV, 20A/DIV)

그림 5. 스너버 방식에 따른 파형(AC 220V입력)



a) IGBT 양단간 전압전류파형 (500V/DIV, 20A/DIV)

b) Buck 컨버터 출력전압 및 IGBT 입력전류 파형 (100V/DIV, 20A/DIV)

그림 6. AC 380V입력시 정격부하에서의 Energy Recovery Snubber를 갖는 Buck 컨버터 각부 파형

주 스위치 소자 (IGBT)의 turn-off시 넓은 입력전압 및 부하조건에서 스너버 캐패시터의 방전에 따라 영전압 스위칭함을 볼 수 있고, 출력전압에 있어서도 스위칭에 따른 peak-to-peak surge 전압이 발생하지 않음을 알 수 있다. 표 1은 220VAC 입력전압일때 single module buck 컨버터에 있어서 RCD snubber 및 energy recovery snubber 적용시의 비교를 나타냈다.

전체 효율측면에서는 energy recovery snubber 방식이 RCD snubber 방식에 비해 25W-50W 정도의 스위칭 손실의 차이가 난다. 이는 그림 5에서처럼 IGBT의 상승과 하강시간이 0.5μs정도로 짧기 때문에 전체손실중에서 스위칭손실이 주는 영향은 크지 않지만, IGBT Turn-off 및 on시 나타나는 peak 전압은 현저한 차이가 있음을 알 수 있고, 입력전압이 380VAC일 경우는 그 정도의 차가 더욱 크게 나타난다는 것을 쉽게 예상할 수 있다.

	RCD Snubber		Energy Recovery Snubber	
	50%	100%	50%	100%
Input Power (W)	5,760	11,600	5,820	11,620
Output Power(W)	5,602.	11,112.8	5,668	11,221
Effency (%)	97.265	95.8	97.39	96.57
Power factor(P.F)	0.913	0.934	0.907	0.936
Peak Voltage(V)	400V	430V	320V	340V

표1. 스너버 방식에 따른 비교

2.2 제어회로 설계

Free voltage regulation 기능을 갖는 Buck컨버터의 제어회로에 대한 설명은 다음과 같다. 그림 1에서 Buck컨버터 후단 ZCS resonant DC/DC컨버터와의 제어전원을 공동으로 사용하기 위해 buck 컨버터 출력전압 제한을 절연된 DC 전압센서(LV25-P)를 사용하였고, 전압센서의 출력이 전류형태로 나오므로 이를 전압으로 변환시켜주는 전류-전압 변환기를 통해서 기준전압과 비교하여 그 차인 에러신호가 삼각파 발생회로(20kHz)와 comparator에서 비교하여 펄스폭 제어로 IGBT를 구동할 수 있도록 구성되어져 있고, 과전압, 과전류 고장신호 및 DC/DC 컨버터부에서의 고장신호가 발생했을때 TR1을 도통시킴으로서 기준 전압을 방전하여 Clear시킵과 동시에 IGBT구동신호를 차단할 수 있도록 구성하였고, 초기에 주회로 전원부입시 주회로 전원이 정상상태에 이를 때까지 soft start 및 구동신호를 줄수 없도록 초기 reset회로를 부가하였다.

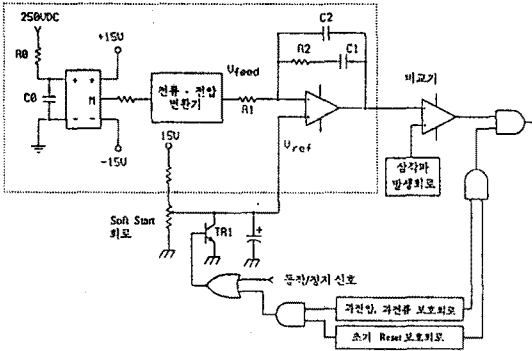


그림 7. 제어회로 구성도

교환기능 정류기는 220VAC 또는 380VAC를 입력받아 3φ다이오드로 정류하여 필터링하기 때문에 부하증가시와 AC입력전압이 높을 수록 정류된 360Hz의 큰 ripple 전압이 buck 컨버터 입력전원 Vin으로 들어오기 때문에 제어회로의 compensator 설계시 입력전압의 ripple 및 넓은 입력전압을 span하기 위해 특히 주의하여 설계할 필요가 있다.

일반적으로 빠른 응답특성을 얻기위해 전체 loop 시스템의 cross over frequency를 높은 주파수대 (스위칭주파수의 1/5 즉, 4kHz)에 둔다면, 입력전압의 ripple을 보상하기 위해 compensator가 ripple에 해당하는 소신호에 응동하여 낮은 입력 ripple 전압 일때는 큰 에러신호를 높은 ripple 입력전압일때는 적은 에러신호를 출력함으로써 더 큰 입력 ripple성분을 만드는데 조장시킬 뿐만 아니라 compensator 에러신호의 ripple성분에 따른 스위칭에 의해 Buck 컨버터 출력측 고주파 인덕터를 포화되게 만들어 인덕

터에 큰 전류가 유입되고 소음을 발생시킬 뿐만 아니라 스위칭 소자의 전류 stress를 증가 시킨다.

따라서 compensator 설계시 입력전압의 ripple 성분에 대한 영향을 제거시키기 위해서는 설계시 그림 9의 Bode plot에 나타난 것처럼 1 zero와 2 pole근의 주파수대를 20, 50, 100Hz부근에 둘로서 전체 loop 시스템의 crossover frequency가 40Hz(리플주파수의 1/8~1/6)정도에서 0dB를 cross하도록 설계해야 된다.

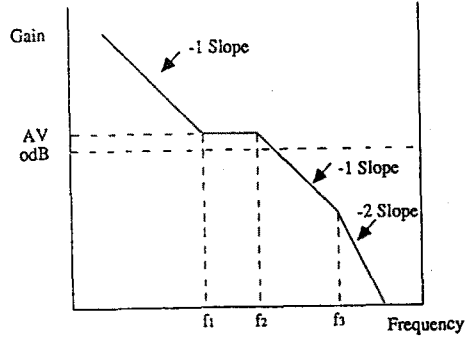


그림 8. Compensator Bode plot

Buck 컨버터의 open loop 전달함수와 그림 7의 점선안의 compensator 전달함수 및 zero 와 pole근에 대한 표현식을 (3), (4), (5), (6), (7), (8)식에 나타냈다.

$$G(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta d(s)} = \frac{E/LC}{S^2 + \frac{S}{RC} + \frac{1}{LC}} \quad \dots (3)$$

$$H(s) = \frac{1}{R_0 C_0 S + 1} \cdot \frac{s R_2 C_1 + 1}{R_1 S [R_2 C_1 C_2 S + C_1 + C_2]} \quad \dots (4)$$

$$AV = \frac{R_2}{R_1} \quad \dots (5)$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \quad \dots (6)$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi R_0 C_0} \quad \dots (7)$$

$$f_3 = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \quad \dots (8)$$

이에 대한 Buck 컨버터 closed loop 시스템의 Bode plot를 그림 9에 나타냈다. loop 시스템의 crossover frequency가 34Hz, Phase margin이 82°, Gain margin이 20dB정도로 넓은 전압범위에 대해서도 span할 수 있는 매우 안정한 시스템임을 알 수 있다.

그림 10(a)와 (b)는 3상 380VAC 입력을 받는 free voltage Buck 컨버터 출력전류의 50% → 100% → 50%급변시의 시뮬레이션 및 특성시험결과를 나타냈다.

출력전류의 급변시 출력전압변동은 약 ±1.2%이고, 정상상태에 이르는 시간은 50ms이내로 양호한 과도특성을 얻었다. 또한 출력 전압에 있어서도 입력전압 ripple분에 대한 성분은 전혀 나타나지 않음을 알 수 있다.

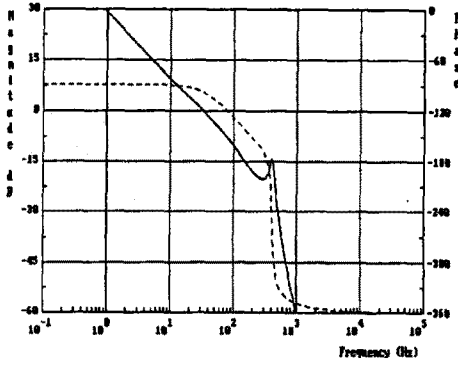
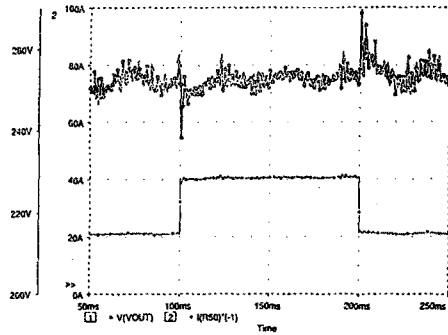
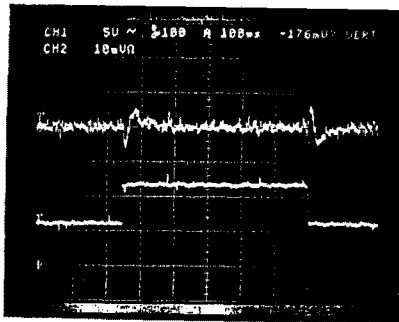


그림 9. Buck 컨버터 closed loop 시스템 Bode plot



a) 시뮬레이션 파형



b) 실험 파형

그림 10. 50% → 100% → 50% 부하급변시 출력전압 및 전류파형

2.3 효율 및 역률특성

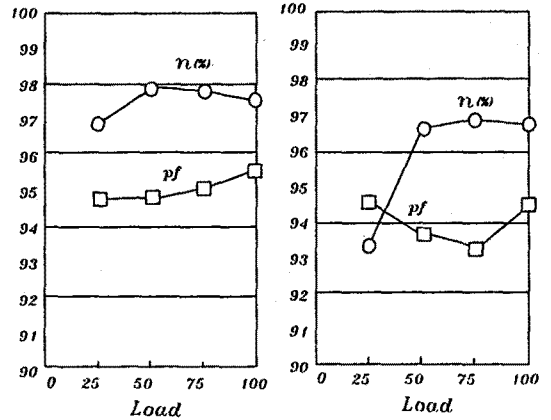
그림 11에 free voltage regulation 기능을 갖는 3상 AC 입력 Buck 컨버터의 각 입력전압에 따른 효율 및 역률 특성을 나타냈다.

380VAC 입력의 경우 220VAC 입력의 경우에 비해 효율특성이 경부하에서 특히 낮게 나타났다. 이는 같은 부하조건에서 스위칭시 소자에 흐르는 rms 전류값이 220VAC 입력의 경우보다 크기 때문에 전체적으로 효율특성이 조금 떨어질 것을 알 수 있다.

하지만 정격부하에서는 각각 97.4%, 96.9% 정도로 입력전압의 변

화가 부하가 증가할수록 효율에 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있다.

입력측 dc reactor (7.5mH) 값 때문에 전류의 연속성이 유지되고 넓은 입력전압범위 및 부하범위에 대해서 0.93이상의 양호한 역률특성을 볼 수 있다.



a) 220VAC 입력

b) 380VAC 입력

그림 11. 입력전압에 따른 효율 및 역률특성

3. 결론

기존 전회국에서 운용중인 교환기용 정류기중 일부는 입력 정류부가 Thyristor 위상제어방식이 적용되어 입력역율이 낮고, 입력 필터부 용량이 크며, 승압에 대비한 기존기기의 활용성등이 취약하였다. 이런 결점을 개선하고자 본 연구에서는 energy recovery snubber를 갖는 buck converter topology를 적용하여 광범위한 입력전압(208Vac~418Vac)기능을 갖는 고효율(97%), 고역율(95%) rectifier unit(250VDCout, 45A, 20kHz)를 개발하여 주회로 설계, snubber circuit, 제어회로 설계기법등에 대해 서술하고 이를 prototype의 실험을 통해 Free Voltage Regulation 기능을 갖는 교환기용 정류기에 적용가능함을 실증하였다.

본 연구를 통해 개발된 시스템은 220VAC 또는 380VAC 입력전원 모두에 직접 적용할 수 있으므로 기존 또는 신설 전회국의 정류장 치로서 향후 많은 수요가 예상된다.

□ 참고문헌

- 1.조기연, 김은수외, "고주파 공진형 방식을 이용한 교환기용 정류기 개발", 과학 기술처 보고서 1992년 12월
2. Whitcomb, E.C., "Designing Non-Dissipative Current Snubbers for Switched Mode Converters", POWERCON 6, Sixth International Solid State Power Electronics Conference and Exhibit, 1979 (Power Concepts, Inc., Ventura, CA).
3. Shaughnessy, W.J., "Modeling and Design of Non-Dissipative LC Snubber Networks", POWERCON 7, Seventh International Solid-State Power Electronics Conference and Exhibit, 1980 (Power Concepts, Inc., Ventura, CA).
4. L.G. Meares, "Improved Non-Dissipative Snubber Design for Buck Regulators and Current-Fed Inverters", "Proceeding of Powercon 9, 1982