

단일 전력단 단상 공진형 영전류 스위칭 역률 개선 회로

구관본, 이준영, 윤명중

한국과학기술원 전기 및 전자공학과

Single-Stage Single-Phase Integrated ZCS Quasi-Resonant Power Factor Preregulator Based on Forward Topology

Gwan-Bon Koo, Jun-Young Lee, Myung-Joong Youn

Department of Electrical Engineering in Korea Advanced Institute of Science & Technology

Abstract

An integrated zero current switching(ZCS) quasi-resonant converter(QRC) for power factor correction and high efficiency with single switch is proposed in this thesis. Boost integrated circuit operating discontinuous conduction mode(DCM) and QRC are used for power factor correction and reducing switching loss, respectively. A prototype converter has been designed and experimented. At rated condition, the THD in the input current waveform of this prototype has approximately 18%. The efficiency is obtained about 70%, the power factor is about 0.985 as well.

Therefore, the proposed converter is suitable for a low power level converter with operating switching frequency above several hundred kHz.

1. 서 론

현대의 대부분 전자 시스템들의 소형화, 고효율화 추세에 맞추어서 SMPS 분야 역시 작은 용량에서도 고효율을 갖는 전원 공급 장치의 모듈 개발이 요구되고 있다. 본 논문에서는 100W(5V, 20A)급의 소용량 컨버터에서 손실을 줄여서 효율을 높이는 새로운 회로의 전원 공급 장치 모듈을 제안한다.

최근에는 전류왜곡이나 역률에 대한 각종 규제들 때문에 그에 대한 향상 노력이 많이 요구되고 있다. DCM으로 동작하는 Boost 컨버터를 파워 컨버전을

하는 컨버터의 앞단에 덧붙이므로써 역률의 향상은 어느정도 꾀할 수 있다. 이를 구현하기 위해서 두 단으로 이루어진 역률 개선 회로와 단일 단으로 이루어진 역률 개선 회로 등 두가지 topology가 고려될 수 있다. 그런데 전자의 방법은 전력을 두 번 변환하므로 효율이 저감되고 두 개의 제어기를 사용하므로 시스템의 부피가 증가할 뿐만 아니라 제작 비용도 많이 소모된다. 특히 100W급의 소용량 시스템에서는 더욱 부적합하다. 따라서 본 논문에서는 단일 스위치로 역률 개선과 파워 컨버전을 동시에 수행할 수 있는 회로를 제안한다.

또한 컨버터를 고주파로 동작시키는데 있어서 장애가 되는 스위칭 손실을 줄이기 위해 공진형 스위치를 이용한 영전류 스위칭이 가능하도록 만들어주었다. 그리고 기본 topology는 forward type을 사용하기 때문에 출력 전류가 연속적으로 흐르게 되어 출력에 리플이 적게 된다.

본 논문에서는 스위칭 손실을 줄여주고, 역률도 개선하면서, 입력 전류의 영점 교차시에 발생하는 왜곡과 출력 전압의 리플을 적게 해주는 공진형 영전류 스위칭 역률 개선 회로를 제안하고 실험을 통해서 그 결과를 보여준다.

2. 제안한 회로와 그 동작원리

역률을 개선하기 위해서 앞단에 DCM의 Boost를 덧붙이는 경우, 아래의 그림 1과 같이 두 단으로 연결되는 회로를 생각할 수 있다. 앞단에서 역률을 개

선해주고, 뒷단에서는 파워 컨버전용으로 forward type를 이용하면 출력 전류의 리플도 줄일 수 있으며, 공진형 스위치를 이용하면, 스위칭 손실을 줄일 수 있는 등의 장점을 갖고 있다.

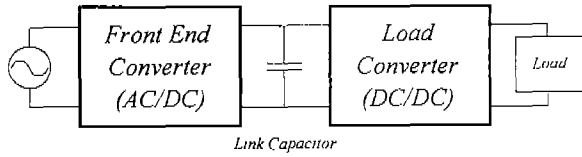


그림 1. 두 단으로 이루어진 역률개선 회로의 블록도

하지만, 이러한 방법은 전력을 부스트단의 스위치를 통해서 한 번, 파워 컨버전단의 스위치를 통해서 또 한 번, 이렇게 두 번에 걸쳐서 변환하게 되므로 효율이 저감되고, 스위치 두 개에 각각 제어회로가 필요하므로 시스템의 부피와 비용이 많이 든다는 단점을 갖게 된다. 이에 다음과 같은 회로를 제시한다.

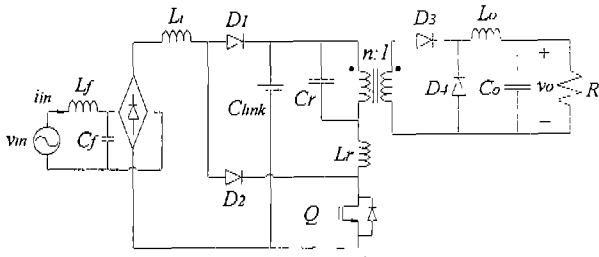


그림 2. 단일 스위치로 구성된 영전류 스위칭 역률 개선 회로

앞의 그림 1과 다른 점은 부스트 단의 스위치를 없애면서, 부스트 컨버터의 입력 인덕터를 다이오드를 통해서 forward 컨버터 스위치의 드레인에 연결시켜, 남은 스위치 하나로 역률 개선, 출력 전압 레귤레이션, 공진형 스위치를 이용한 스위칭 손실 저감등의 장점을 얻게 되는 것이다.

이제 위에서 제시한 본 논문의 컨버터를 각 모드별로 해석을 해보도록 하자.

Mode 1 : 주 스위치 도통구간 I ($t_0 - t_1$)

스위치가 켜지는 순간부터 공진 capacitor(C_r)의 양단에 걸리는 전압이 양(+)으로 걸릴때까지의 구간을 말한다. 우선 이 구간에서는 이전의 모드에서 C_r 에 걸려있는 전압이 음(-)의 방향으로 충전되어 있으므로, 트랜스포머는 도통을 할 수 없게 되어 있다. 따라서 출력측은 D_4 를 통해서 환류하고 있고, 트랜스포머의 1차측은 link capacitor로부터 나온 전류가 L_r 과 C_r 를 통해서 공진하면서 흐르게 된다. 한편 link capacitor(C_{link})에 걸리는 전압이 입력 전압과 입력 inductor(L_i)에 걸리는 전압을 합한 것보다 크므로 입력측의 D_1 은 도통되지 않고, D_2 를 통하여 스위치를

거쳐 흐르게 되고, 이때 L_i 에 흐르는 전류(I_{Li})는 그림 8의 파형과 같이 선형적으로 증가한다.

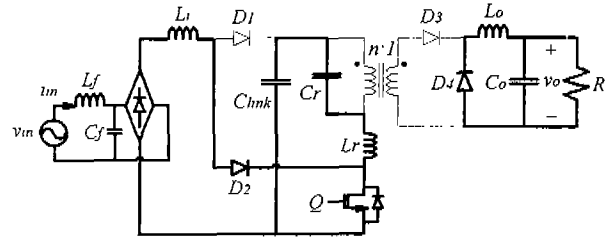


그림 3. Mode 1의 등가회로

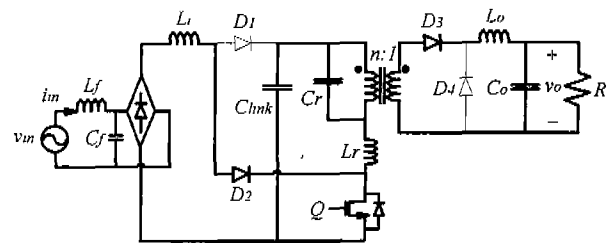


그림 4. Mode 2의 등가회로

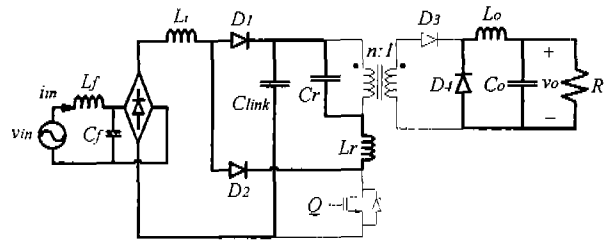


그림 5. Mode 3의 등가회로

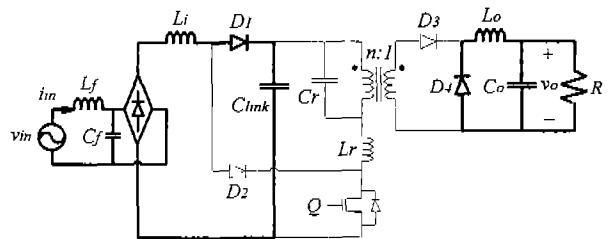


그림 6. Mode 4의 등가회로

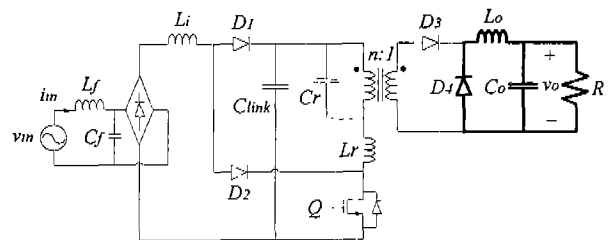


그림 7. Mode 5의 등가회로

3. 실험결과

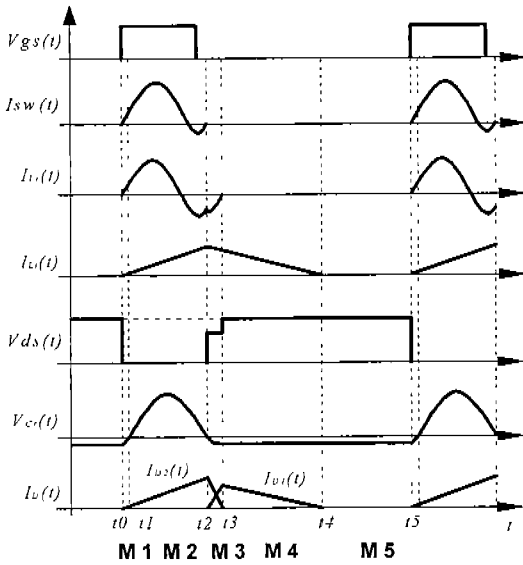


그림 8. 각 모드별 파형

Mode 2 : 주 스위치 도통구간 II ($t_1 - t_2$)

스위치에 흐르는 전류가 L_r 과 C_r 에 의해서 공진을 하는 부분이다. Mode 1에서는 C_r 에 걸리는 전압이 음이었으므로 트랜스포머를 통해 2차측으로의 에너지 전달이 이루어지지 않았지만, Mode 2에서는 C_r 에 걸리는 전압이 양이 되었으므로, 트랜스포머의 1차측 권선에도 전류가 흘러 D_3 을 통해서 부하로 에너지가 전달된다. 그 이외의 동작은 Mode 1에서와 비슷하다.

Mode 3 : 주 스위치 차단구간 ($t_2 - t_3$)

스위치가 꺼지는 순간부터 Mode 3이 시작된다. L_r 에 흐르던 전류는 그 방향과 크기가 갑자기 바뀔 수가 없으므로 D_2 는 계속 켜져 있는 상태로 유지가 되어야 한다. 동시에 D_1 이 도통되기 시작해서 에너지가 L_i 로부터 C_{link} 로 전이되게 되는 것이다. 따라서 Mode 3에서부터는 I_{L_i} 가 선형적으로 감소하게 된다. 또한 Mode 3에서는 C_r 에 걸리는 전압이 다시 음으로 떨어지게 되므로, 트랜스포머를 통해서 2차측으로 에너지가 넘어가는 것은 불가능하다.

Mode 4 : 입력 인덕터 에너지 방출구간 ($t_3 - t_4$)

Mode 4는 스위치가 꺼진 상태에서, 공진하는 주기는 모두 끝나고, D_1 을 통해서 L_i 에 저장되어 있던 에너지가 C_{link} 로 저장되는 구간이다. 이 구간은 L_i 에 저장되어 있던 에너지가 모두 방출되고 나면 끝난다.

Mode 5 : 부스트 컨버터 불연속 구간 ($t_4 - t_5$)

Mode 5는 L_i 에 흐르던 전류가 모두 방출되어서 트랜스포머의 1차측에는 어떠한 전류의 경로도 형성되지 않고, 다만 2차측에서만 출력 inductor의 전류가 D_4 를 통해서 환류하게 된다. I_{L_i} 가 zero가 된 것을 제외하고는 Mode 4와 동일하다.

Prototype 컨버터의 스위치는 IRFP450 MOSFET을 사용했고, 제어단은 UC3860을 이용한 PI 제어를 이용했다.

그림 9은 V_{in} 이 $110V_{rms}$ 로 입력될 때, 입력 전압과 입력 전류, 입력 인덕터 전류와 출력 전압을 보여주고 있다. 입력 전압과 전류의 위상차가 없고, 전류의 왜곡이 크게 보이지 않음을 확인할 수 있다. 그리고 입력 인덕터에 흐르는 전류가 완벽히 DCM으로 동작하는 것도 볼 수 있다.

그림 10는 스위치에 걸리는 전압과 흐르는 전류, 입력 인덕터에 흐르는 전류와 공진 캐패시터에 걸리는 전압을 보여준다. 모드별 해석을 할 때에 보였던 파형과 유사한 파형을 얻었다.

그림 11에서는 공진이 진행되는 구간과 스위치가 꺼진 바로 다음의 구간에서 공진 인덕터에 흐르는 전류의 offset이 변하므로써 발생하는 왜곡을 볼 수 있고, 또 입력 다이오드가 두 개 모두 도통이 되는 구간에서 스위치의 양단에 걸리는 전압이 편평하게 유지됨을 볼 수 있다.

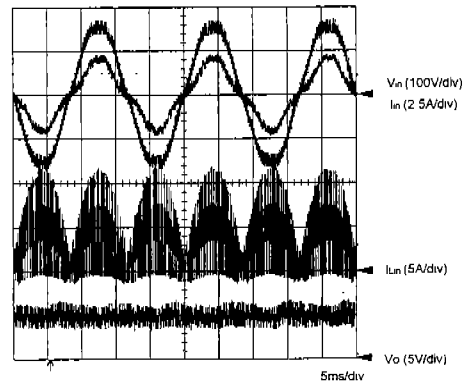


그림 9. V_{in} , I_{in} , I_{L_i} , V_o

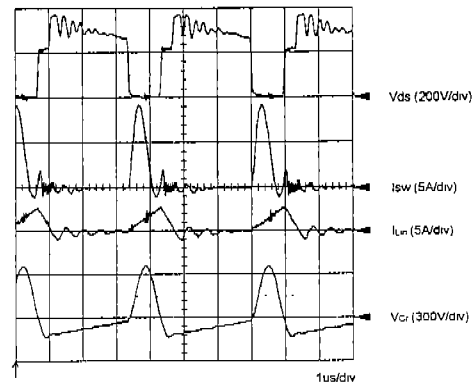


그림 10. V_{ds} , I_{sw} , I_{L_i} , V_{Cr}

4. 결론

본 논문에서는 공진 스위치를 이용하여 영전류 스위칭을 하는, 단상으로 이루어진 100W급 컨버터를 제안하였다. 역률은 0.985정도, 효율은 70%정도가 얻어졌다. 효율이 70%정도가 얻어진 것은 스위치의 턴온 손실, 출력 다이오드의 턴온 손실, 스너버에서의 열손실, 그리고 트랜스포머를 포함한 여러 소자들의 손실이 원인이 되는 것이다. 그 중에서 가장 큰 손실분은 출력 다이오드에서 생성되는데, 이를 줄이기 위해서 출력측에 synchronous rectifier로 다이오드를 대체하는 방안등을 연구하는 것이 앞으로 해야할 과제이다.

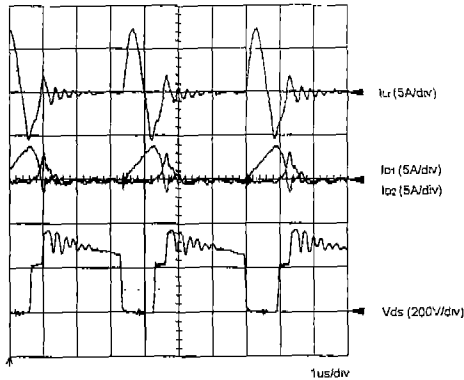


그림 11. I_{Lr} , I_{D1} & I_{D2} , V_{ds}

그림 12은 부하가 0.25Ω 걸려 있다가 0.5Ω으로 바뀌는 경우에 대한 실험이다. 부하변동에 대해서 제어가 잘 동작함을 확인할 수 있다. 그림 13는 반대로 half load에서 full load로의 실험이다.

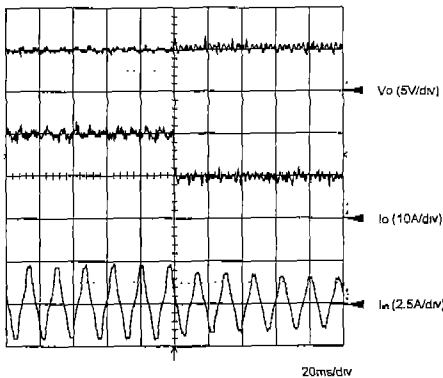


그림 12. 부하변동 (full load → half load)

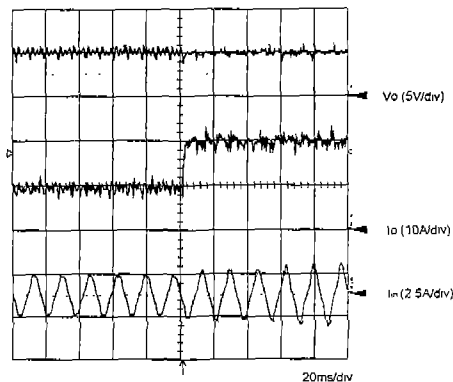


그림 13. 부하변동 (half load → full load)

참고문헌

- [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 Electronic Conference and Exposition*, 1990, pp.792-801.
- [2] K. H. Liu and F. C. Lee, "Resonant switches - a unified approach to improved performances of switching converters" in *Proceedings of the International Telecommunications Energy Conference* 1984, pp.344-351
- [3] J. Sebastian, J. A. Martinez, M. M. Hemando, J. A. Cobos, and F. Aldana, "Power factor correction using zero-current-switched quasi-resonant converter with voltage-follower and multiplier approach control" in *European Conference on Power Electronics and Applications*, 1995, pp.2.023-2.028
- [4] J. Sebastian, J. A. Martinez, J. M. Alonso, and J. A. Cobos, "Voltage follower control in zero-current-switched quasi-resonant power factor preregulators" in *IEEE Transaction on Power Electronics*. VOL.13. NO.4. July 1998, pp.727-738
- [5] M. H. Kheraluwala, R. L. Steigerwald, and R. Gurumoorthy, "A fast-response high power factor converter with a single power stage" in *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1991, pp.769-779
- [6] D. Balocco and C. Zardini, "The half-wave quasi-resonant ZCS flyback converter as an automatic power factor preregulator : An evaluation." in *IEEE Applied Power Electronics Conference*, 1996 pp.138-144
- [7] M. Madigan, R. Erickson, and E. Ismail, "Integrated high quality rectifier regulators" in *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 199 pp.1043-1051