

동기 정류기를 이용한 위상 변위 제어 클램프 모드 포워드 다중 공진형 컨버터

송종화*, 김창선**, 김희준***

*한양대 기전공, **목포대 정보공학부, ***한양대 전기공

Phase Shift Controlled CM ZVS-MRC with Synchronous Rectifier

Jong-Hwa Song*, Chang-Sun Kim**, Hee-Jun Kim***

****Hanyang Univ. **Mokpo National Univ.

Abstract - To solve the low efficiency problem of low-voltage power supplies, it has been studied to replace the schottky barrier diode with the MOSFET synchronous rectifier.

In this paper, Phase Shift-Controlled Clamp Mode Zero Voltage Switching-Multi Resonant Converter with Synchronous Rectifier (PSC CM ZVS-MRC with SR) is presented to achieve high efficiency in low-voltage power supplies. The characteristics analysis of synchronous rectifier is established by using the MOSFET equivalent circuit and efficiency comparison is established between the Synchronous Rectifier and the schottky barrier diode.

To verify the validity of the analysis, 33W(3.3V,10A) PSC CM ZVS-MRC with self-driven synchronous rectifier at switching frequency of 1MHz is designed and tested. And it is confirmed that the experimental results are well consistent with the theoretical results. The maximum efficiency of the converter is 83.4% at full load, which is 3.3% higher than conventional schottky diode rectification.

형 컨버터가(Phase Shift Controlled CM ZVS-MRC) 제안 되었다[5]. 한편 전자통신 시스템의 소형,경량화에 응용되는 on-board형 저전압(3.3V) 전원장치에 있어서 정류부에는 주로 쇼트키 다이오드가 이용되는데 이 경우 다이오드의 순방향 전압강하에 의한 손실이 전체손실의 30% 이상을 차지함으로써 시스템의 고효율화에 커다란 장애가 되고 있다. 따라서 쇼트키 다이오드를 도통저항 $R_{DS(on)}$ 이 작은 MOSFET로 대체함으로써 on전압 강하를 감소시켜 정류부의 손실을 저감할 수 있는 동기 정류기 방식이 제안되었고, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[6-7].

본 논문에서는 저전압 전원 장치의 고효율화를 위하여 정류부에 동기 정류기를 적용한 위상 변위 제어 클램프 모드 공진형 컨버터를 제안하여 해석 하였고 실험을 통해 본 회로의 타당성을 입증하였다. 실험에 사용된 컨버터는 고정 주파수 1MHz에서 동작하고 입력전압 48V, 출력전압 3.3V, 33W의 정격을 갖는다. 실험 결과, 컨버터는 한 주기 동안 10개의 다른 모드로 동작하며 기존의 쇼트키 다이오드를 정류기로 사용한 경우와 비교하여 손실이 저감되어 효율이 개선되고 있음을 입증 하였다.

1. 서 론

영전압스위칭 다중공진형 컨버터 (Zero Voltage Switching Multi-Resonant Converter: ZVS-MRC)는 대부분의 기생 리액턴스 성분을 공진회로에 흡수함으로써 주스위칭과 정류부 스위칭의 영전압 스위칭을 가능하게 하여 시스템의 고주파화와 효율향상, 소형화에 큰 잇점을 갖는다[1-2]. 그러나 공진현상에 의한 높은 전압 스트레스로 인해 오프라인 방식의 전원에 적용이 어려운 단점이 있다[3]. 또한, 주파수 가변 제어 방식으로 인하여 소형화에 제약이 있고, 주파수 가변에 따라 노이즈 발생 패턴이 변화하는 단점이 있다[4]. 이러한 단점을 극복하기 위해 위상 변위 제어 클램프 모드 포워드 다중공진

2. 동기 정류기를 이용한 위상 변위 제어 클램프 모드 다중공진형 포워드 컨버터

그림 1은 동기 정류기를 이용한 위상 변위 제어 클램프 모드 포워드 다중공진형 컨버터를 나타낸다. 위상 변위 제어 클램프 모드 포워드 다중공진형 컨버터의 정류부에 기존의 쇼트키 다이오드 대신에 MOSFET 정류기인 SR_1 , SR_2 를 사용하여 동기 정류기를 구성하였고, 각 게이트 단자를 서로 다른 MOSFET의 드레인 단자에 접속하여 변압기 2차 측 전압으로 이를 직접 구동시키는 자기구동 방식을 사용 하였다.

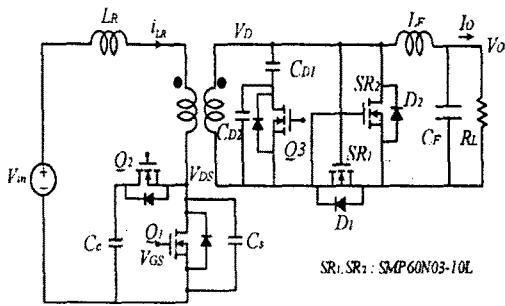


그림 1. 동기 정류기를 이용한 위상 변위 제어 클램프 모드 포워드 다중 공진형 컨버터

2.1 SR회로의 구성과 동작해석

동기 정류기의 해석을 위해 MOSFET의 선형모델을 이용하였으며 컨버터의 출력부를 출력 필터의 인덕턴스 값이 충분히 크다는 가정하에 동기 정전류원 I_O 로 대치 하였다.

위의 가정을 토대로 컨버터의 출력부를 포함하는 정류부의 등가회로를 그림 2에 나타내었다. 이 그림에서 MOSFET의 선형 모델은 이상적인 스위치 $S(S_1, S_2)$, 채널의 on저항 $R_{dson}(R_{dson1}, R_{dson2})$, 그리고 역병렬 다이오드의 등가 모델로 구성되는데, 다이오드의 등가모델은 이상적인 다이오드 $D(D_1, D_2)$, 순방향 전압강하 $V_f(V_{f1}, V_{f2})$, 그리고 다이오드의 벌크 저항 $R_b(R_{b1}, R_{b2})$ 로 구성된다.

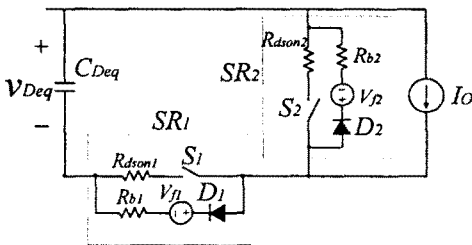


그림 2. 정류부의 등가회로

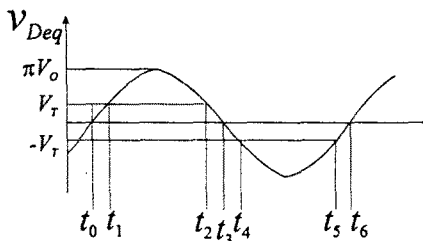


그림 3. 근사화 된 V_{Deq} 의 파형

그림 3은 V_{Deq} 의 파형을 정현파의 파형으로 근사적으로 나타낸 것이다. 그림 2와 그림 3을 토대로 동기 정류 회로의 동작을 해석할 수 있다.

우선, t_0 에서 변압기 2차 측 전압 V_{Deq} 가 양(+)으로

증가하면 출력전류 I_O 는 MOSFET SR_1 의 역병렬 다이오드 D_1 을 통해 흐르며, 이 구간은 V_{Deq} 가 SR_1 의 문턱 전압에 도달하는 t_1 까지 계속된다.

t_1 에서 V_{Deq} 가 SR_1 의 문턱 전압에 도달하면 D_1 은 off되고 SR_1 의 채널 스위치 S_1 이 도통되면서 출력 전류 I_O 는 SR_1 의 채널을 통하여 흐르게 된다. t_2 에서 V_{Deq} 가 SR_1 의 문턱 전압 이하로 떨어지게 되면 I_O 는 역병렬 다이오드 D_1 을 통해 흐르면서 V_{Deq} 의 전압이 0이 되는 t_3 까지 계속된다.

반면에 V_{Deq} 가 음(-)의 값(t_3-t_6)이 되면 위와 같은 동작을 반복하나 SR_1 대신 SR_2 가 on이 된다. 따라서 위의 내용중 SR_1 을 SR_2 로 바꾸어 줌으로써 동일한 해석이 가능하게 된다.

3. PSpice 시뮬레이션

그림 4는 컨버터를 PSpice 시뮬레이션 프로그램을 이용한 시뮬레이션 결과 파형이다. V_{S1}, V_{S2}, V_{S3} 는 각각 주 스위치 S_1 , 클램프 스위치 S_2 , 위상 변위 제어 스위치 S_3 의 게이트 파형을 나타낸다. V_{DS1} 는 주 스위치 S_1 의 드레인-소스 파형으로 전압이 클램프 됨을 알 수 있고 변압기 1차 측 전류 i_{LR} , 변압기 2차 측 전압 V_{CD} , 2차 측 공진 커패시터 i_{C1} 등 전압, 전류 파형은 기존의 위상 변위 제어 클램프 모드 다중 공진형 컨버터와 동일한 특성을 나타낸다

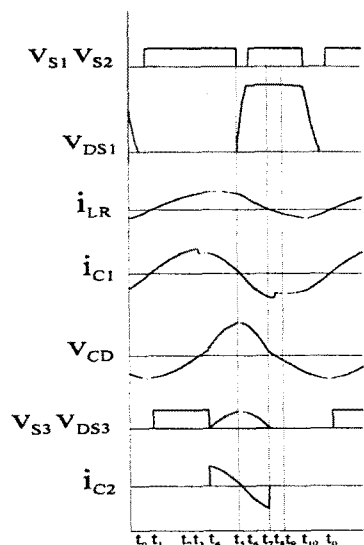


그림 4. PSpice 시뮬레이션 파형

4. 실험 및 고찰

4.1 실험 회로도

입력전압 48V, 출력전압 3.3V, 스위칭 주파수 1MHz, 33W인 동기 정류기를 이용한 위상 변위 제어 클램프 모드 포워드 다중 공진형 컨버터의 실험 회로 블록도를 그림 5에 나타내었다.

1차측에는 고정주파수를 발생시키는 발진회로, 데드타임 설정회로, 스위치를 구동시키기 위한 구동회로 등으로 구성된다. 2차측은 출력전압의 오차를 검출하는 오차 증폭기, C_1 에 흐르는 전류를 검출하여 제어신호를 만드는 위상 변위 제어회로, 위상 변위 제어 스위치를 구동하기 위한 구동회로 등으로 구성된다.

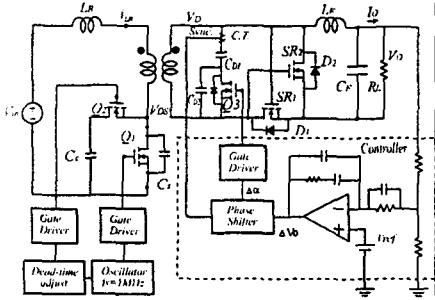


그림 5. 동기 정류기를 이용한 위상 변위 제어 클램프 모드포워드 다중 공진형 컨버터의 블럭도

4.2 실험 결과 파형 및 동작특성

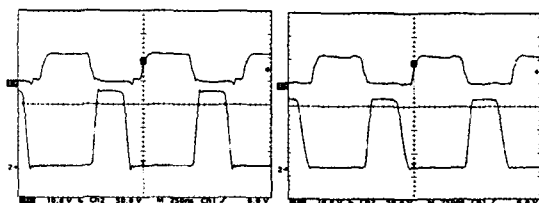
입력전압 48V, 출력 33W(3.3V, 10A), 고정 스위칭 주파수 1MHz를 갖는 위상 변위 제어 클램프 모드 포워드 다중 공진형 컨버터의 정류부에 동기 정류기를 채택한 회로를 제작하여 실험을 하였다.

그림 6은 주 스위치 S_1 의 게이트 구동 전압과 드레인-소스간의 파형을 나타낸다. 중 부하시에 클램프 전압이 감소하며 파형으로부터 측정된 전압 스트레스는 142V로서 입력전압의 약 2.9배로 클램프 됨을 알 수 있다.

그림 7은 변압기 2차측 전압을 나타낸다. 변압기 2차측 전압은 사인과 형태로 SR_1 과 SR_2 를 공진형태로 구동한다.

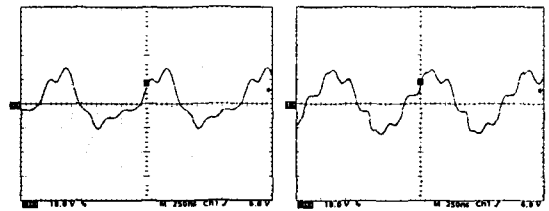
그림 8은 위상변위제어 스위치 S_3 의 게이트 전압 파형과 드레인-소스 전압파형으로 중부하시에 게이트 구동전압의 폭인 위상변위 α 가 작아지며, 드레인-소스 전압파형은 공진함을 알 수 있다.

정류기에서의 전압강하를 비교하기 위해 동일한 세트의 정류부에 MOSFET (SMP60N03-10L) 동기 정류기와 Schottky diode (ESAC83-004) 정류기를 사용하였다.

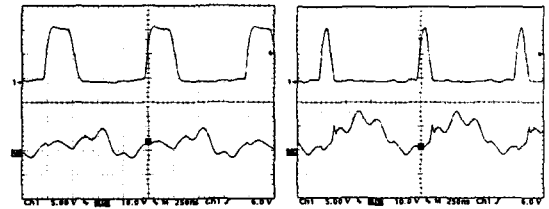


(a)At light load, $I_o=1[A]$ (b)At full load, $I_o=10[A]$

그림 6. CH1 : 주스위치의 게이트 전압, V_{gs}
CH2 : 주스위치의 드레인 전압, V_{ds}



(a)At light load, $I_o=1[A]$ (b)At full load, $I_o=10[A]$
그림 7. 트랜스포머 2차 측 전압, V_{cd}



(a)At light load, $I_o=1[A]$ (b)At full load, $I_o=10[A]$

그림 8. CH1 : 위상변위제어 스위치의 게이트 전압, V_{gs}

CH2 : 위상변위제어 스위치의 드레인 전압, V_{ds}

그림 8은 위상 변위 α 를 매개변수로 해서 나타낸 동기 정류기를 이용한 위상 변위 제어 클램프 모드 포워드 다중 공진형 컨버터의 개루프(Open-Loop) 특성이다. 이 특성으로부터 α 가 증가할수록 출력 전압은 낮아지며 폐루프(Closed-Loop)에 의해 출력 전압을 제어할 때 부하전류가 증가하면 α 는 작아져야함을 알 수 있다.

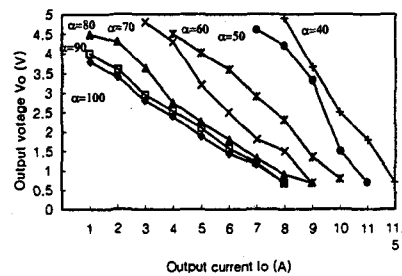


그림 9. 개루프시 부하전류에 대한 출력전압 특성

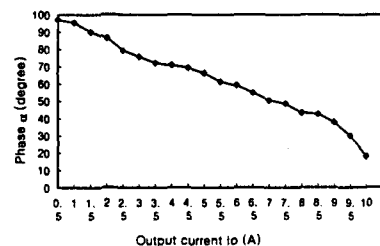


그림 10. 위상 변위각의 변화

그림 10는 폐루프(Closed-Loop) 상태에서 부하전류와 위상 변위각 α 의 관계를 나타낸 그림으로 부하가 증가함에 따라 위상 변위각 α 가 작아진다.

그림 11은 주 스위치의 전압 스트레스를 나타낸 것으로 부하가 증가함에 따라 스트레스가 감소하며 중 부하시 142V로서 입력전압의 약 3배로 클램프됨을 알 수 있다.

그림 12는 동기 정류기를 사용한 위상 변위 제어 클램프 모드 포워드 다중 공진형 컨버터의 효율을 나타낸다. 중 부하시 최고 효율은 83.4%이다. 비교를 위해 동일한 세트에 쇼트키 정류기를 사용한 경우의 효율을 나타내었다. 이 그림으로부터, MOSFET 동기 정류기를 사용했을 경우 쇼트키 다이오드 정류기를 사용했을 때 보다 중부하시 3.3%의 효율이 향상됨을 알 수 있다.

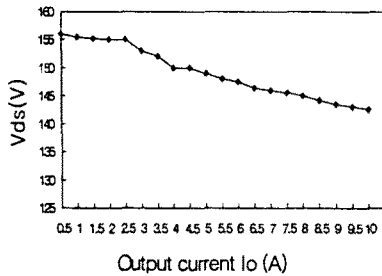


그림 11. 주 스위치의 전압 스트레스

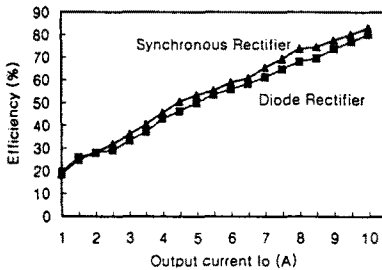


그림 12. 동기 정류기와 쇼트키 다이오드를 이용한 위상 변위 제어 클램프 모드 다중 공진형 컨버터의 측정된 효율

5. 결론

기존의 저전압 전원장치의 고효율화를 위해 위상 변위 제어 클램프 모드 포워드 다중 공진형 컨버터의 정류부에 쇼트키 다이오드 대신에 MOSFET 동기 정류기를 적용한 회로를 제안하였다.

제안된 컨버터는 2차측 공진 커패시턴스를 위상 변위 제어 스위치로 제어하여 공진 주파수를 가변함으로써 출력전압을 안정화 시키므로 고정 주파수에서 동작한다.

시뮬레이션을 통해 동작을 확인하였고 스위치의

스위칭 상태에 따라 10개의 모드로 나누고 모드별 해석을 하였다. 스위칭 주파수 1MHz, 입력전압 48V, 출력 33W(3.3V, 10A)인 컨버터를 제작하여 실험한 결과, 부하전류가 증가함에 따라 주스위치의 전압 스트레스와 공진전류가 감소하며 중부하시 효율이 증가함을 확인하였다. 또한, MOSFET 동기 정류기를 사용한 경우의 최고 효율은 83.4%로 기존의 쇼트키 다이오드를 이용한 경우에 비해 효율에서 3.3%정도의 손실 저감 효과를 얻을 수 있었다.

참고 문헌

- [1] W.A.Tabiz and F.C.Lee, "Zero-Voltage switching multi-resonant technique- A novel approach to improve performance of high frequency quasi-resonant converters," IEEE, PESC, pp. 9-17, 1988.
- [2] W.A.Tabiz and F.C.Lee, " DC analysis and design of zero-voltage switched multi-resonant converter", IEEE, PESC, pp. 862-869, 1990.
- [3] A.W.Lotfi, V.Vorperian, F.C.Lee, "Comparison of stresses in quasi-resonant and pulse width modulated converters , IEEE, PESC, pp. 591-598, 1988
- [4] M.M.Jovanovic, R.Frrington, F.C.Lee, "Constant frequency multi-resonant converters", VPEC proceeding, pp.55-65, 1989
- [5] 金昌宣, 金熙峻, "위상 변위 제어 포워드 다중 공진형 컨버터", 대한전기학회 논문지 44권 8호 pp.1027-1035, 1995
- [6] H.J.Kim, C.S.Leu, R.Farrington, F.C.Lee, "Clamp Mode Zero Votage Switched Multi-Resonant Converters", IEEE, PESC, pp. 78-84, 1992
- [7] W.tabiz, F.C.Lee and Dan Y.Chen, "A MOSFET Resonant Synchronous Rectifier for high frequency DC/DC Converter", IEEE, PESC, pp. 769-779, 1990