자기구동 동기정류를 위한 고효율 DC/DC컨버터의 특성비교

°윤석호,문건우,윤종수*,김용
°한전전력연구원 전력계통연구실 차세대전력전송그룹, *동국대학교 전기공학과

(Characteristics of High Efficiency DC/DC Converter for Self-Dr Synchronous Retifier)

°Suk-Ho Yoon, Gun-Woo Moon, Jong-Soo Yoon, Yong Kim
°FACTS & Protection Group, Electrical System Research Lab., KEPRI, *Dongguk Univ.

Abstract - Recently, new trend in telecommun -ication device is to apply low voltage, about 3.3V-1.5V. However, it is undesirable in view of high efficiency and power desity which is the most important requirement in the distributed power system. Rectification loss in the output stage in on-board converter for distributed power system are constrained to obtain high efficience at low output voltage power suppies. This paper explains the basic operational principles of three kinds of ZVS DC/DC converters with self-driven synchronous rectifier. The three topologies are analyzed by simulation and exprimentation, and the characteristics comparisons of high efficience converter are carried out in view of the minimized rectification losses in the out stage.

1. 서 론

분산전원 시스템에서 사용되는 낮은 출력전압의 DC/DC컨버터에 높은 효율을 얻는다는 것은 매우 어렵다. 이것은 출력 정류기단의 쇼트키 다이오드의 전압강하로 인한 손실이 상당히 크기 때문이며 이 손실은 쇼트키 다이오드를 MOSFETs 자기구동 동기정류기로 대치함으로써 저감될 수 있다[1]-[2].

출력단의 손실비는 저전압(3.3V,1.5V)이 될수록 증가한다. 그러므로 컨버터 효율개선은 정류단의 쇼트키 다이오드를 더 낮은 전압강하를 가지는 동기정류기로 대치함으로써 정류기단 손실을 최적화 할 수 있다. 높은 스위칭 주파수로 동작할 때 동기정류기로 가장 적절한 소자는 전력MOSFETs이다. 이것은 출력 정류기단의 다이오드를 MOSFETs으로 대치함으로써 다이오드의 전압강하는 MOSFETs의 온-저항에 의한 전압강하 형태로 된다.

본 논문에서는 분산전원 시스템의 온-보드 컨버터에서 출력전압 5V를 가지는 자기구동 동기정류기 구동에 적합한 3가지 토포로지를 제시하였다. 입력전압 48V(38V≤Vin≤58V)와 출력전압5V, 출력전류 40A를 가지는 컨버터에서 각 회로별 동작특성과 효율 비교를 통하여 고효율, 고전력밀도를 가지는 최적의 구동회로 방식을 제안하였다.

2. 자기구동 동기정류기

2.1자기구동 동기정류기 동작특성

낮은 출력전압의 컨버터에서 출력 정류기단 쇼트키 다이오드의 전압강하가 상당히 크기 때문에 전체 시스템의 고효율이 제한된다. 그림 1은 효율 증가를 위해 전력MOSFETs으로 구성된 자기구동 동기정류기 구성회로 및 자기구동 동기정류기 구동전압인 변압기 2차전압 파형을 나타낸다. 이들의 동작은 변압기 2차권선 전압 파형에 의해 온,오프되는데 이것은 MOSFETs 동작특성이 변압기 2차 구동 전압파형과 리셑방식에 의해 의존한다는 것을 의미한다[3]. 동기정류기의 고효율을 성취하기 위해 그림 1(b)의 점선과 같은 이상적인 변압기 2차측 전압(Vsec)은 시비율 50%와 최대의 파형기울기를 가짐으로써 최적의 MOSFETs/다이오드 전도기간비를 가지며 구동손실과 전도손실을 저감 시킬 수 있다.

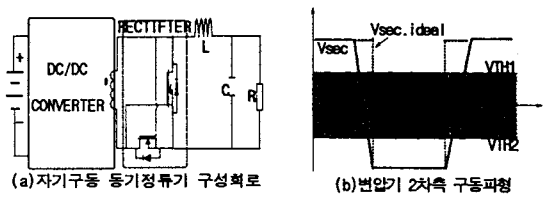


그림1. 공진형 자기구동 동기정류기 구동회로 및 구동파형

그림 1(b)에서 보듯이 자기구동 동기정류기를 사용하는 경우 변압기 2차 구동전압이 MOSFETs의 Vth(임계전압)보다 낮을 때 MOSFETs는 오프되고

출력전류는 쇼트키 다이오드를 통하여 흐른다. 이때 전압강하는 대략 0.4V이다. 변압기 2차권선에서 전압이 Vth보다 커지면 MOSFETs는 도통되고 전압강하는 약 0.06V이다. 이와 같이 자기구동 동기정류기에서 다이오드와 MOSFETs의 전압강하 차이 만큼의 전력손실이 저감된다. MOSFETs 주요손실은 온 저항손실과 구동손실로 구성되어 있다. MOSFETs의 전압강하를 감소하기 위하여 매우 낮은 온저항(R_{SRON})이 필요하며 MOSFETs의 전도기간을 증가시키기 위해서는 매우 낮은 Vth 특성을 갖는 MOSFETs가 필요하다. 또한 구동손실의 저감을 위하여 낮은 게이트 저항(R_g)이 요구된다. 식(1)과 식(2)는 MOSFETs 동기정류기 및 쇼키트 다이오드의 손실값을 나타낸다.

$$P_S = R_{SRON} I_O^2 D + \frac{1}{2} C_{iss} V^2 f_s \quad \text{.....(1)}$$

$$P_D = I_O V_{drop} + I_O^2 R_{DSON} \quad \text{.....(2)}$$

R_{SRON} : MOSFETs 온저항, D : 듀티율,
C_{iss} : MOSFETs 입력캐패시턴스,
f_s : 스위칭주파수, I_o: 출력전류, V : 입력전압
Vdrop : 다이오드 순방향 전압강하
R_{DSON} : 다이오드 온저항

자기구동 동기정류기에 사용되는 전력MOSFETs은 낮은 온저항(R_{SRON})과 낮은 게이트저항(Rg) 그리고 낮은 임계전압(Vth)을 가질수록 정류기단의 손실을 감소시킬 수 있으며 변압기 2차전압 또한 중요한 변수가 된다.

2.2 자기구동 동기정류기 손실특성

자기구동 동기정류기의 손실을 개선하기 위해서는 구동전압이 0이 되는 데드타임 제거와 낮은 Vth를 갖는 구동전압으로 MOSFETs스위치를 온,오프하여 다이오드 도통율를 감소시키는 것이 필요하다. 정류기단에서 손실구성은 다이오드 손실(P_{diode}), MOSFETs의 전도손실(P_{RDSON}), 게이트 저항 손실(P_{gate})로 구성된다. 이들 손실을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$P_{DIODE} = \frac{2}{\pi} \omega_{tsr} [I_0 (V_F + I_0 R_{SCH})] \quad \text{.....(3)}$$

$$P_{RDSON} = I^2_0 R_{DSON} [1 - 2\frac{\omega_{tsr}}{\pi}] \quad \text{.....(4)}$$

$$P_{gate} = \pi^2 V^2 \omega^2 C_g{}^2 R_g \quad \text{.....(5)}$$

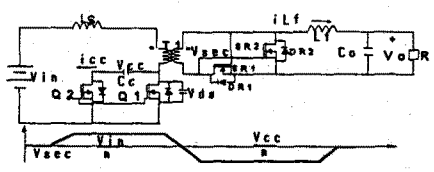
Rg:게이트 저항, Cg:MOSFET 게이트 기생 캐패시턴스, V_F: 다이오드 전압강하, R_{SCH}:다이오드 내부저항, ω_{tsr}: 임계전압 주기 ω:스위칭주파수, V:게이트 입력전압

동기정류기의 전체손실은 다음과 같다.

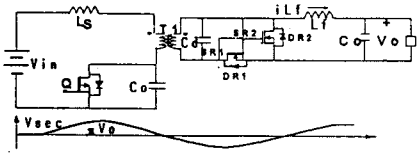
$$P_L = P_{DIODE} + P_{RDSON} + P_{gate} \quad \text{.....(6)}$$

2.3 자기구동 동기정류기 구동 토포로지

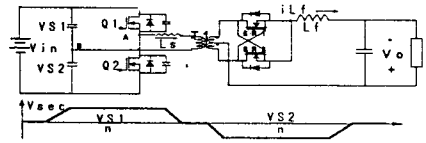
자기구동 동기정류기 효율개선을 위해 가장 적절한 토포로지 선정기준을 다음과 같이 제시한다.
첫째는 고전력밀도를 위해서는 높은 스위칭 주파수가 필요하며 둘째로 높은 효율은 동기정류단 개선을 통하여 얻을 수 있다. 셋째는 변압기 2차 전압파형을 개선하여 구동손실과 전도손실을 감소시킬 수 있다.
동기정류기의 효율은 변압기 2차 전압 파형에 따라 다르기 때문에 동기정류기가 최적 구동되는 3개의 토포로지를 비교하여 결정하기로 한다. 그림 2는 제안된 3개의 토포로지와 변압기 2차 전압파형을 나타낸다. 그림에서 변압기구조, 정류기단, 출력필터는 같을지라도 1차측 회로구성은 다르다.
그림 2(a)는 액티브클램프 포워드컨버터(Active Cla-mp Forward Converter:AFC)를 나타낸다. 여기서는 보조 MOSFETs 스위치를 사용하여 변압기를 리셀 시키며 에너지를 전원쪽으로 회송한다. 이회로는 고정된 스위칭 주파수, 1차측 스위치의 클램프된 낮은 전압, 변압기 권선의 리셀 동작으로 코아의 대칭동작 등의 장점을 가지고 있으며 데드타임의 제거로 변압기 2차측 전압이 자기구동 동기정류기를 위해 최적에 가까운 구동 파형을 발생한다. 설계방식 또한 어느 제어방식 보다도 간단하다.
그림 2(b)의 회로는 영전압 다중공진 컨버터(Zero Voltage Switching Muti-Resonant Converter: ZVS-MRC)를 나타낸다. 이방식은 변압기의 2차측 공진캐패시터(C_d)단의 2차 전압파형이 거의 정현파에 가깝기 때문에 기울기가 너무 작아서 다이오드 도통을 피할 수는 없다. 또한 공진인덕터와 캐패시터는 크기면에서 다른 회로보다 비경제적이나 MOSFETs 동기정류기의 게이트 기생캐패시턴스를 공진회로에 흡수할수 있어 게이트 구동손실이 줄어든다.
그림 2(c)는 영전압 하프브리지 컨버터(Zero Vol-tage Switching Half Bridge Converter : HBC)



(a) 액티브클램프 컨버터형 구동회로및 전압파형



(b)영전압 다중공진컨버터
구동회로 및 전압파형



(c)하프브리지 컨버터형
구동회로 및 전압파형

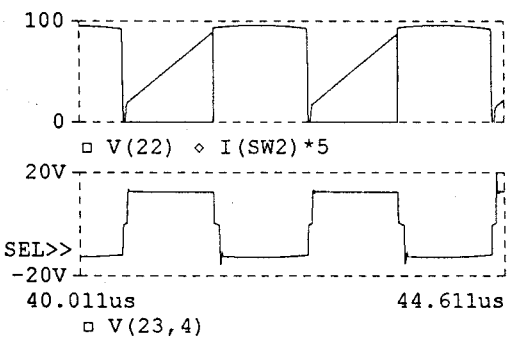
그림2. 제안된 동기정류기 구동 토포로지
및 2차구동 전압파형

로 1차측 스위치의 상보적 동작으로 변압기 리셋을 위한 별도의 회로가 필요없다. 1차측의 상보적 제어로 2차측 전압, 전류의 맥동분을 저감시켜 필터의 크기를 줄일 수 있다.

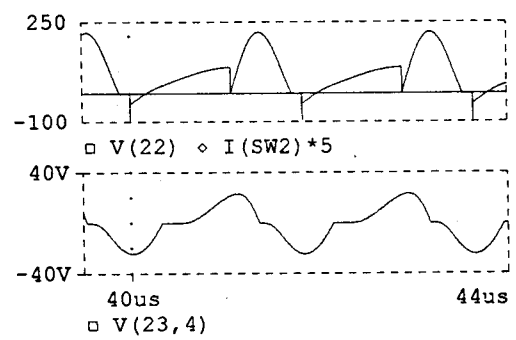
3. 동작특성 해석 및 시뮬레이션

3.1 특성해석 및 시뮬레이션

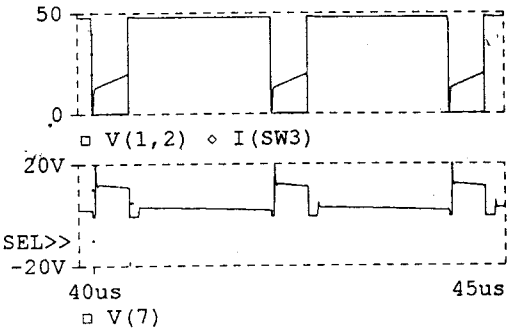
그림 3은 3가지 토포로지에 대한 DC/DC컨버터의 시뮬레이션 동작특성을 보인다.



(a) AFC 스위치단 전압,전류 파형 및
2차 구동전압 파형



(b) ZVS-MRC 스위치단 전압,전류 파형 및
2차 구동전압 파형

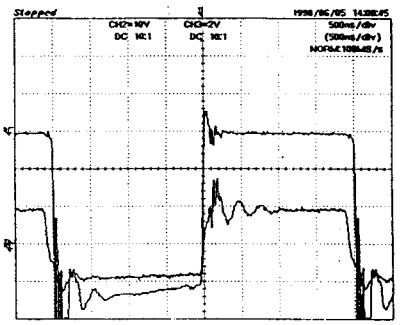


(c) HBC 스위치단 전압,전류 파형 및
2차 구동전압 파형

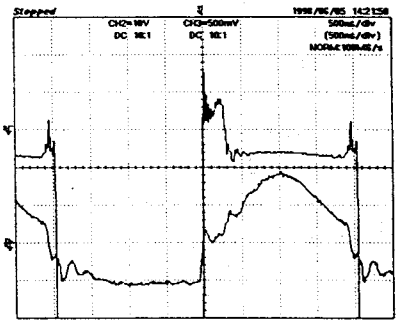
그림3. 제안된 회로의 시뮬레이션 동작특성

각각의 파형은 주스위치 전압,전류파형과 2차측 구동전압 파형을 나타낸다.

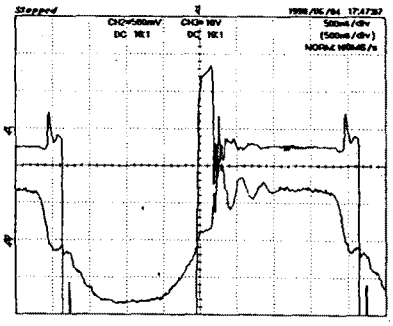
그림 4는 제안된 회로의 동기정류기에서 나타나는 3가지 회로의 실험파형을 보여준다. 아래 파형은 변압기 2차측 구동파형(Vsec:10V/div)이고 윗 파형은 동기정류기에서 나타나는 전압강하 파형(200mV/div)이다. 이파형에서 전압강하는 쇼트키 다이오드가 전도될때와 비교하여 MOSFETs가 전도될때가 1/4이상 감소된다.



(a) AFC구동파형 및 MOSFETs 전압파형



(b) ZVS-MRC구동파형 및 MOSFETs 전압파형



(c) HBC구동파형 및 MOSFETs 전압파형

그림4. 제안된 회로의 구동전압 파형 및 동기정류기 동작파형

3.2 스위치단 전압스트레스 및 부하특성

그림 5는 부하전류 변화에 대한 컨버터 1차측에 흐르는 전류의 실효값을 나타낸다.

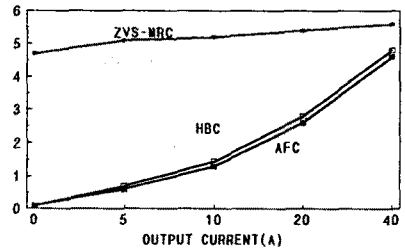


그림5. 부하전류와 1차측 스위치 실효전류

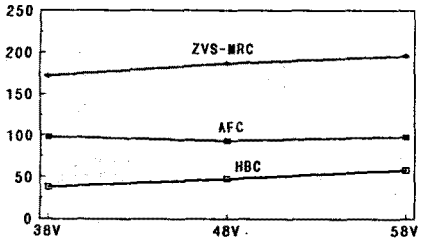


그림6. 입력전압 과 스위치 전압스트레스

그림 6은 입력전압 변화에 대한 스위치 전압 스트레스를 나타낸다. 입력전압이나 부하가 넓은 범위로 변화될 때 회로의 동작특성을 살펴보면 다른 회로에 비하여 ZVS-MRC에서는 큰 전압,전류 스트레스를 가지며 또한 입력전압과 부하 변동에 영향을 받는다.

3.3 효 율

그림 7은 3개회로에서 출력전류 변화시 효율을 나타내었다. 시뮬레이션을 통하여 각 회로별로 효율을 구한 결과 HBC에서 효율이 가장 낮다. 이유는 1차측 순환에너지에 의하여 전도손실이 크며 변압기 1차측 전압이 2차측으로 전달되지 않는 구간이 발생하여 상대적으로 쇼트키 다이오드의 도통구간이 넓어지기 때문이다. ZVS-MRC에서는 공진 인덕터와 순환에너지에 의한 전도 손실과 동기정류기단에서 최적 구동파형이 아니기 때문에 MOSFETs의 도통기간이 70~80% 정도로 AFC에 비하여 작기 때문에 효율의 저감을 보인다. 그러나 AFC에서 얻어진 효율은 상당히 양호하다(89%).

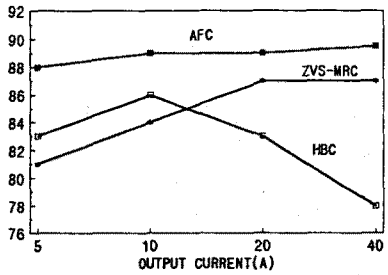


그림7. 출력전류와 토포로지별 효율특성

4. 결 론

AFC는 다른 회로방식에 비하여 효율면에서 우수함이 입증되었으며 다음과 같은 장점을 갖는다.

- 자기구동 동기정류기를 위한 양호한 2차전압파형
- 고정된 스위칭 주파수
- 클램프된 낮은 스위치전압 스트레스
- 전도에너지 회송
- 변압기 리셋에 의한 코아의 대칭동작

[참 고 문 헌]

[1] R.A. Blanchard, P.E. Thibodeau,"The Design of a High Efficiency, Low Voltage Power Supply Using MOSFET Synchronous Rectification and Current Mode Control", IEEE Power Electronics Specialists Conference Record, pp.355-361,1985

[2] N.Murakami, H.Namiki and K.Sakakibara."A Simple and efficiency Synchronous Rectifier for Forward DC/DC Converter", IEEE Applied Power Electronics Conference. 1993

[3] C.S.Leu, G.Hua and F.C.Lee, "Comparison of Forward Topologies with Various Reset Scheme". Proceedings of the VPEC Seminar,1991.