

동기정류기를 이용한 Two Transistor Forward 컨버터에 관한 연구

배진용* . 김 용* . 권순도** . 이규훈*** . 조규만*
 *동국대학교. **대림대학. ***스마트비전텍. *충주기능대학

A Study on the Two Transistor Forward Converter using Synchronous Rectifier

Jin-Yong Bae* . Yong Kim* . Soon-Do Kwon** . Kyu-Hoon Lee*** . Kyu-Man Cho*
 *Dongguk University. **Daelim College. ***Smartvision Tech. *Chongju Polytechnic College

Abstract - This paper presents the TTFC(Two Transistor Forward Converter) using Synchronous Rectifier. The principle of operation, feature and design considerations are illustrated and verified through the experiment with a 200W 100kHz MOSFET based experimental circuit.

1. 서 론

본 논문에서는 저전압·대전류 시스템에 적용할 수 있는 동기정류기를 이용한 TTFC(Two Transistor Forward Converter)에 관하여 논하였다.[1] 2차측 회로에 동기정류 방식을 이용하여 기존의 Forward 컨버터의 문제점을 해결한 동기정류기를 이용한 Two Transistor Forward 컨버터를 제안한다.[2]

2. 본 론

2.1 제안된 TTFC 컨버터

그림 1은 기존의 TTFC 회로를 나타낸다. Two Transistor Forward 회로는 1차측에 두 개의 스위치와 두 개의 환류 다이오드로 구성되며, 일반적인 Forward 컨버터에 비하여 리셋 권선이 제거되고, 스위치 스트레스가 저감된다는 장점을 지니고 있다.[1] 그러나 일반적으로 저전압·대전류 출력을 요구하는 경우에 2차측 정류 다이오드 전도손실이 증대하는 문제점을 지니게 된다. 일반적으로 저전압·대전류 컨버터의 효율은 식(1)로 나타낼 수 있다.[3]

$$\eta = \frac{P_0}{P_0 + P_{loss} + P_{REC}} \quad (1)$$

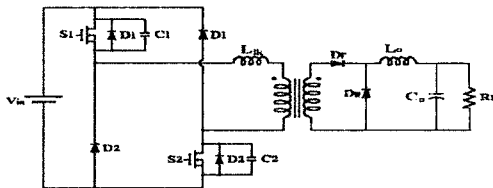


그림 1. 기존의 TTFC 회로

여기서, P_0 : 출력 전력
 P_{loss} : 정류기 손실을 제외한 나머지 손실
 P_{REC} : 정류기 손실
 다이오드 정류기 방식의 컨버터의 효율은 식(2)로 나타낼 수 있다.[3]

$$\eta_{Diode} = \frac{P_0}{P_0 + P_{loss} + P_D} \quad (2)$$

여기서, P_D : 정류 다이오드 손실

그림 2는 2차측에 동기정류 방식을 이용한 TTFC 회로를 나타낸다. 제안된 컨버터는 2차측 정류 다이오드 대신에 동기정류기를 적용하여 전도 손실이 저감되는 장점을 지닌다.

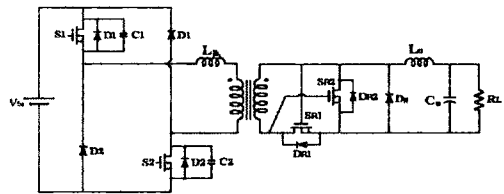


그림 2. 동기정류기를 이용한 TTFC 회로

동기정류기 방식의 컨버터의 효율은 식(3)으로 나타낼 수 있다.[3]

$$\eta_{SR} = \frac{P_0}{P_0 + P_{loss} + P_{SR}} \quad (3)$$

여기서, P_{SR} : 동기정류기 손실
 식(3),(4)로부터 동기정류기 방식의 효율은 식(4)로 나타낼 수 있다.[3]

$$\eta_{SR} = \frac{P_0}{P_0/\eta_{Diode} - P_D + P_{SR}} \quad (4)$$

동기정류기의 손실은 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$P_{SR} = R_{ds} I_0^2 (1 - D_{dead}) + V_{DI} D_{dead} + P_{gate} + P_{RREC} \quad (5)$$

여기서, R_{ds} : 동기정류기의 드레인 소스 사이의 저항
 D_{dead} : 동기정류기 SR2가 동작하지 않는 듀티 구간(T_{dead} / T_s)
 P_{gate} : 동기정류기 게이트 손실
 P_{RREC} : 동기정류기의 역병렬 다이오드 손실

2.2 이론적인 파형 및 동작특성

그림 3과 그림 4는 동기정류기를 이용한 TTFC의 모드별 동작 파형과 등가 회로를 나타낸다.

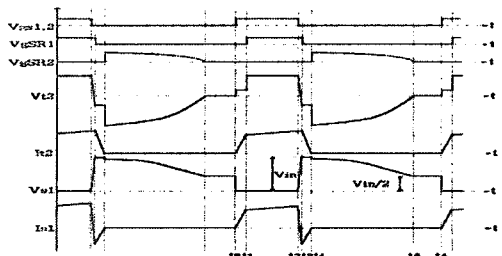
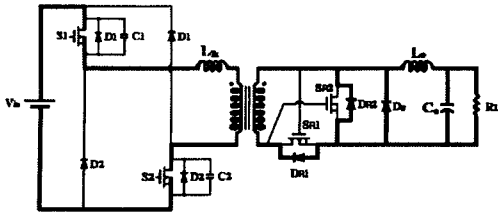
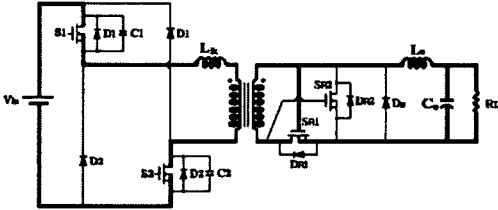


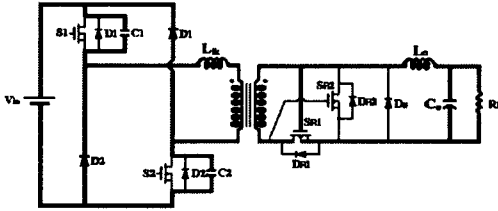
그림 3. 제안된 회로의 이론적인 각부 파형



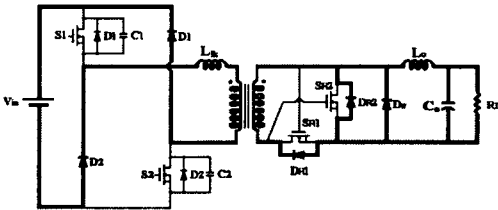
MODE I ($t_0 \sim t_1$)



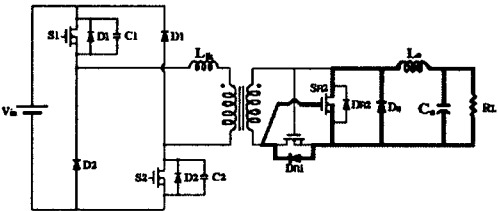
MODE II ($t_1 \sim t_2$)



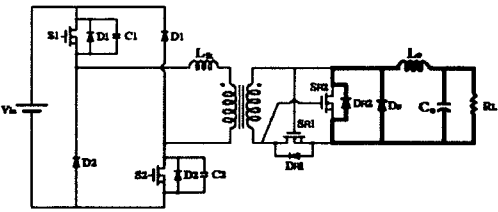
MODE III ($t_2 \sim t_3$)



MODE IV ($t_3 \sim t_4$)



MODE V ($t_4 \sim t_5$)



MODE VI ($t_5 \sim t_6$)

그림 4. 제안된 회로의 모드별 동작

1) 모드 I : $t_0 \leq t \leq t_1$

스위치 S_1 과 S_2 의 턴온시 입력 전력이 출력측으로 전달되기 시작하는 구간이며, 동시에 출력 인덕터 L_0 에 저장된 에너지가 환류 다이오드 D_w 와 D_{R2} 를 통하여 계속적으로 환류하는 구간이다. 이 구간에서 스위치 전류의 기울기는 단지 누설 인덕터 L_{lk} 에 의해 제한되며, 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$I_S = \frac{V_{in}}{L_{lk}} t \quad (6)$$

이 모드의 끝에서 1차측 전류를 I_1 이라고 정의한다.

2) 모드 II : $t_1 \leq t \leq t_2$

변압기 2차측에 전압이 유기되어 동기정류기 SR_1 을 통하여 출력으로 전력이 전달되는 구간이며, 기존의 다이오드 정류기에 비하여 동기정류기가 전도 손실이 저감되므로 효율 향상을 할 수 있다. 이 구간에서 스위치 전류의 기울기는 출력단 인덕터 L_0 에 의해 제한되며, 식(7)로 나타낼 수 있다.

$$I_S = I_1 + \frac{V_{in}}{L_0} t \quad (7)$$

이 모드의 끝에서 1차측 전류를 I_2 라고 정의한다.

3) 모드 III : $t_2 \leq t \leq t_3$

스위치 S_1 과 S_2 가 턴오프되면, 1차측으로 흐르는 전류는 스위치 커패시터(C_1, C_2)를 충전시킨다. 누설 인덕터 L_{lk} 와 C_1, C_2 가 공진하여 스위치 커패시터 전압(V_c)을 상승시킨다. C_1 과 C_2 의 전압이 입력 전압과 같아지면 환류 다이오드 D_1 과 D_2 가 도통하기 시작한다. 이 구간에서 스위치 전압 및 전류는 식(8),(9)로 나타낼 수 있다.

$$V_S = V_{in}(1 - \cos(\omega_1 t)) \quad (8)$$

$$i_S = I_2 - V_{in} \sqrt{\frac{C_t}{L_{lk}}} \sin(\omega_1 t) \quad (9)$$

$$\text{여기서, } C_t = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}, \quad \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_{lk} C_t}}$$

이 모드의 끝에서 1차측 전류를 I_3 라고 정의한다.

4) 모드 IV : $t_3 \leq t \leq t_4$

누설 인덕터 L_{lk} 에 저장된 에너지가 환류 다이오드를 통하여 전원측으로 리셋되는 모드이며, 동기정류기 SR_1 이 오프되어 동기정류기의 내장 다이오드 DR_1 이 도통하며, 동시에 출력 인덕터 L_0 에 저장된 에너지가 환류 다이오드 D_w 와 DR_2 를 통하여 환류하는 구간이다. 이 구간에서 환류 다이오드에 흐르는 전류는 식(10)으로 나타낼 수 있다.

$$I_D = I_3 - \frac{V_{in}}{L_{lk}} t \quad (10)$$

5) 모드 V : $t_4 \leq t \leq t_5$

누설 인덕터 L_{lk} 에 저장된 에너지가 리셋되고, 스위치 커패시터 전압이 변압기 자화 인덕터 L_m 과 공진을 일으키며 $V_{in}/2$ 까지 감소되는 구간이다. 변압기 2차측에 유기된 전압이 동기정류기 SR_2 의 게이트 시그널로 동작하여 출력 인덕터 L_0 에 저장된 에너지의 환류 경로를 제공한다. 이 구간에서 스위치에 인가되는 전압은 식(11)로 나타낼 수 있다.

$$V_S = V_{in} \cdot \cos(\omega_2 t) \quad (11)$$

여기서, $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_m C_t}}$

6) 모드 VI : $t_5 \leq t \leq t_6$
 동기정류기 S_{R2} 가 동작하지 않는 구간이며, 출력 인덕터 L_o 에 저장된 에너지가 환류 다이오드 D_w 와 D_{R2} 를 통하여 환류하는 구간이다.

2.3 실험 결과

제안된 방식의 타당성을 검증하기 위해 100kHz, 200W TTFC를 제작하여 실험하였다. 표 1은 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터 값을 나타낸다.

표 1. 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터

입력전압 (V_{in})	400 V
출력전압 (V_o)	5 V
최대출력 (P_o)	200 W
주 변압기	PQ4040, TDK 40 : 3, $L_{lk} = 91.4\mu\text{H}$
입력단 커패시터 (C_{in})	940 μF
주 스위치 (S_1, S_2)	IXFR26N60Q, IXYS
정류 다이오드 (D_r)	DSEI 2X61, IXYS
환류 다이오드 (D_w)	SF10L60U, Shindengen
동기 정류기 (S_{R1}, S_{R2})	IRFP064N, IR
출력 인덕터 (L_o)	110.93 μH
출력 커패시터 (C_o)	2200 $\mu\text{F} \times 6$
스위칭 주파수 (f)	100 kHz

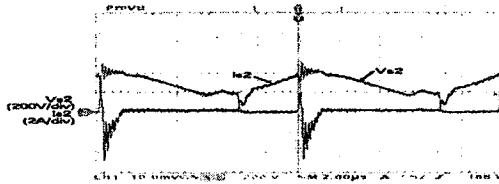


그림 5. 주 스위치 (S_2) 전압·전류 파형



그림 6. 동기 정류기 (S_{R1}) 전압·전류 파형

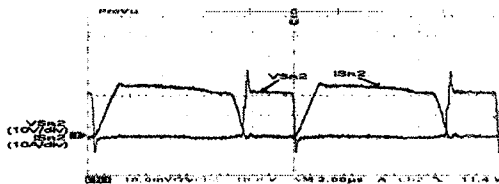


그림 7. 동기 정류기 (S_{R2}) 전압·전류 파형

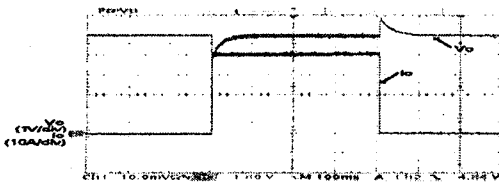


그림 8. 부하변동시 출력 전압·전류 파형

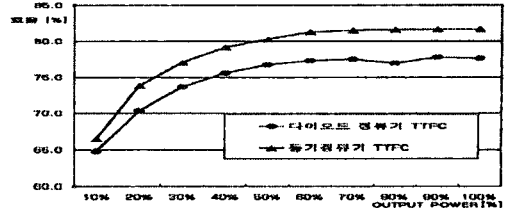


그림 9. 각 방식에 대한 효율비교

그림 5는 주 스위치 S_2 의 전압 및 전류 파형을 나타내며, 그림 6, 7은 동기정류기 (S_{R1}, S_{R2})의 전압 및 전류 파형을 나타낸다. 그림 6로부터 동기정류기 S_{R2} 가 동작하지 않는 듀티 구간이 존재함을 알 수 있으며, 그림 7로부터 동기 정류기 S_{R2} 의 내장 다이오드 D_{R2} 가 동작하는 구간에서 2차측 환류 전류가 약간 감소됨을 알 수 있다. 그림 8은 전부하에서 무부하로 부하가 스텝적으로 변화시 출력 전압 및 전류의 파형을 나타낸다. 출력 전압이 잘 추종됨을 알 수 있다. 그림 9는 다이오드 정류 방식의 TTFC와 동기정류 방식의 TTFC의 효율을 비교한 결과이다.

3. 결 론

본 논문에서는 동기정류기를 이용한 Two Transistor Forward 컨버터를 제안했다. 제안된 컨버터는 1차측에 Two Transistor Forward 회로를 적용하고, 2차측에 동기정류기를 적용하여 1차측 전압/ 2차측 정류 스텔레스를 저감하였다. 제안된 컨버터는 입·출력 전압 차가 큰 강압형 시스템에 적용 가능하리라 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Jovanovic M.M., Zhang M.T., and Lee F.C., "Evaluation of Synchronous-Rectification Efficiency Improvement Limits in Forward Converters", IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 42, No.4, pp. 387-395, Aug 1995
- [2] Eiji Sakai, Seiji Nakamura, Hiroshi Sakamoto, and Koosuke Harada, "MOSFET synchronous rectifier with saturable transformer commutation for high frequency converters" Power Electronics Specialists Conference PESC 1993, pp. 1024-1030, Jun 1993
- [3] Min Chen, Dehong Xu, and Mikihiko Matsui, "Study on magnetizing inductance of high frequency transformer in the two-transistor forward converter" Proceedings of The PCC 2002, vol. 2, pp. 597-602, 2002
- [4] Xie Xuefei, Liu J.C.P., and Poon F.N.K., Pong B.M.H., "Two methods to drive synchronous rectifiers during the dead time in forward topologies", Proceedings of The APEC 2000, pp. 993-999, 2000
- [5] Eiji Sakai and Koosuke Harada, "Synchronous rectifier for low voltage switching converter", Proceedings of The INTELEC 1995, pp. 471-475, Nov 1995
- [6] Zhang, M.T., Jovanovic, M.M., and Lee, F.C., "Design considerations and performance evaluations of synchronous rectification in flyback converters", Proceedings of The APEC 1997, vol. 2, pp. 623-630, Feb 1997
- [7] H. K. Ji, and H. J. Kim, "Active clamp forward converter with MOSFET synchronous rectification", Power Electronics Specialists Conference, PESC 1994, vol. 2, pp. 895-901, Jun 1994