

자기증폭기를 이용한 TTFC 설계 및 동기정류기를 이용한 효율개선

김태군*

한양대 전자전기제어계측공학과

김희준

한양대 전자 컴퓨터 공학부

The Design of TTFC Using Magamp and
An Improvement of Efficiency Using Synchronous Rectifier

Tae-Kun Kim*

Dept. of Electronic & Electrical &
Control & Instrumentation Engineering
Hanyang Univ.

Hee-Jun Kim

School of Electrical Engineering
& Computer Science
Hanyang Univ.

Abstract - In many multiple output SMPS, the cross regulation between the output voltage is so poor that the linear regulator is usually added to avoid this problem. Therefore, manufacturing cost is increased. In this paper, the TTFC(Two Transistor Forward Converter) using the magamp was presented to obtain better cross regulation between the multiple output SMPS. Also, as the synchronous rectifier was applied in the secondary section, whole efficiency can be improved. In this paper, the mode analyses in steady state and experimental results of the prototype to verify the validity of the presented converter are presented and discussed.

1. 서 론

자기증폭기는 신뢰도가 높고 저비용의 다출력 전원장치의 설계 기술로서 저전압, 대전류 시스템에 적용할 수 있는 방법 중의 하나이다. 기존의 TTFC회로는 일반적인 Forward 컨버터에 비하여 리셋 권선이 제거되고 스위치 스트레스가 저감된다는 장점을 지닌다. 그러나 일반적으로 저전압, 대전류 출력을 요구하는 경우 2차측 정류 다이오드 전도손실이 증대하는 문제점을 갖게 된다. 또한 자기증폭기가 스위치와 같이 동작하기 때문에 도통 시간에는 도통손실이 발생한다. 그래서 이런 단점을 보완하기 위해서 변압기 2차측 정류 다이오드 대신에 동기정류기를 적용하여 전도손실을 저감시킴으로써 효율을 높일 수 있는 컨버터를 제안하였다.

2. 본 론

2.1 제안된 컨버터

그림 1은 본 논문에서 제안된 자기증폭기를 이용한 TTFC회로를 나타낸다.

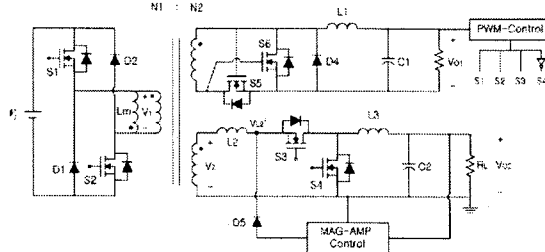


그림 1. 자기증폭기를 이용한 TTFC 회로

그림 1의 회로에서 출력전압 V_{O1} 의 레귤레이션은 1차측 스위치 $S1, S2$ 듀티 사이클의 PWM 제어에 의해서 이루어지며, 자기증폭기를 이용한 출력전압 V_{O2} 의 레귤레이션은 자기증폭기의 인덕터 $L2$ 의 블록킹 시간을 제어하는 자체 궤환루프에 의해서 이루어진다. 즉 스위치 $S1, S2, S3$ 가 온 상태일 때 자기증폭기는 스위치의 오프 상태처럼 동작하고 에너지를 축적하게 된다. $L2$ 에 에너지를 축적하는 시간은 궤환 루프에 의해 정해진다. 그러나 자기증폭기가 포화 되면 자기증폭기는 스위치의 온 상태처럼 동작하게 되어 보조 출력에 에너지를 공급하게 된다. 이때 자기증폭기는 손실이 발생하게 된다.

$$P_{loss} = P_{core} + P_{swrc} \quad (1)$$

이러한 문제점을 2차측 정류 다이오드 대신에 동기정류기를 적용하여 전도손실을 저감시킴으로써 전체효율의 증대를 가져올 수가 있다.

2.1.1 이론적인 파형 및 동작특성

그림 3은 자기증폭기를 이용한 TTFC의 모드별 동작 파형을 나타낸다.

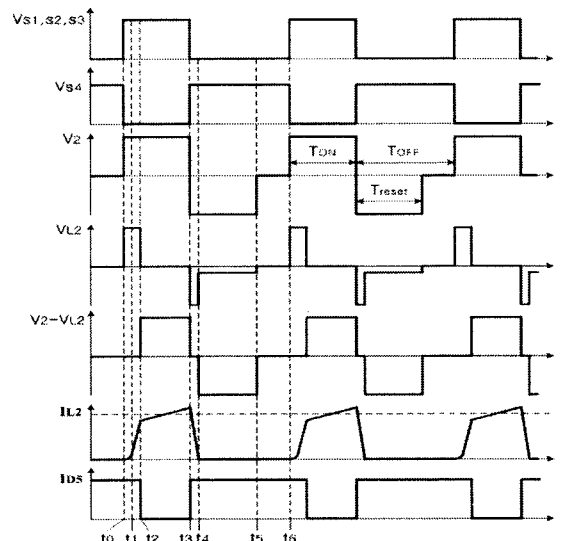
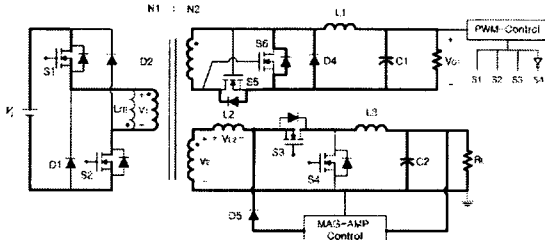
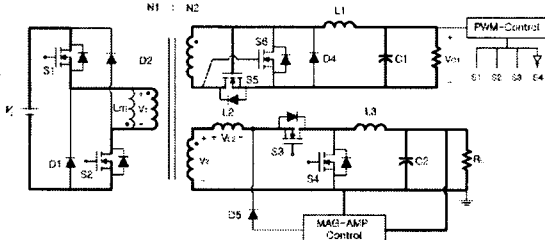


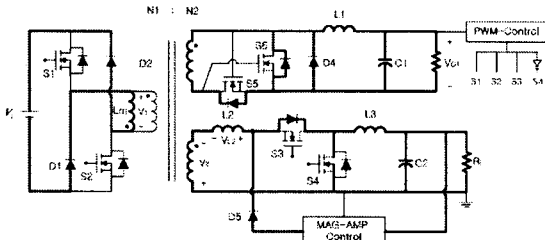
그림 2. 제안된 회로의 이론적 각부 파형



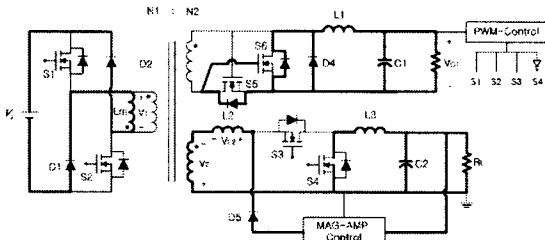
MODE I ($t_0 \sim t_2$)



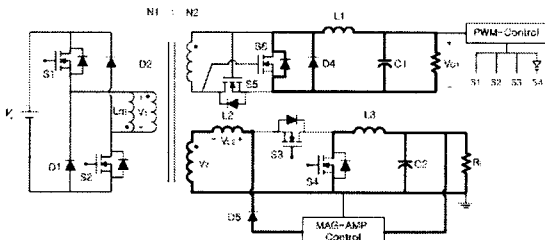
MODE II ($t_2 \sim t_3$)



MODE III ($t_3 \sim t_4$)



MODE IV ($t_4 \sim t_5$)



MODE V ($t_5 \sim t_6$)

그림 3. 제안된 회로의 모드별 동작

자기증폭기를 이용한 TTFC는 일반적인 포워드 컨버터와 비교할 때 L2가 포화되는 구간을 제외 하고는 동작하는 방식이 유사하다. 다음의 그림 4는 제안된 회로의 모드별 동작상태를 나타낸다.

1) MODE I : $t_0 \leq t \leq t_2$

스위치 S1,S2,S3가 온 상태일 때 입력 전력이 변압기 출력 측으로 전달되는 구간이다. 입력전압 V_{in} 은 변압기의 자화 인덕턴스 L_m 을 축적하고, C1에 충전된 에너지가 V_{O1} 으로 전달되게 된다. $t_0 \sim t_1$ 의 구간에서 출력 전류 I_0 와 자기증폭기 자화전류 i_{MA} 와 비교해 보면 L2가 포화되기 전까지 $i_{MA} < I_0$ 이기 때문에 자화전류 i_{MA} 는 이 시간동안 거의 0이라 할 수 있다. 다음 구간인 $t_1 \sim t_2$ 동안에는 자기증폭기가 포화되는 구간이며 자화전류 i_{MA} 는 식 (3)과 같은 기울기로 증가하게 된다.

$$\frac{di_{MA}}{dt} = \frac{V_{in}}{n_2 L_{MA}^{sat}} \quad (3)$$

이 구간에서 자기 증폭기는 스위치의 오프 상태로 동작하게 된다.

2) MODE II : $t_2 \leq t \leq t_3$

스위치 S1,S2,S3가 여전히 온 상태인 구간으로 자기증폭기가 포화된 상태이므로 $i_{MA}=I_{O2}$ 가 되고 이때부터 1차측 전력이 V_{O2} 로 전달된다. 이 시간동안 V_{L2}' 와 V_{O2} 의 전압차에 의해서 D5는 턴-오프 되어 자기증폭기 제어회로는 차단상태가 된다.

3) MODE III : $t_3 \leq t \leq t_4$

스위치 S1,S2,S3가 턴-오프가 되고 동시에 S4가 턴 온이 되어 2차측 V_{O1} 은 L1에 저장된 에너지가 D4를 통해 환류하고, V_{O2} 는 V_2 에 역전압이 걸리게 되어 L2는 리셋 된다. 감소하는 자화전류 i_{MA} 는 스위치 S3가 턴 오프인 상태이기 때문에 S3의 바디 다이오드를 통해 흐른다. i_{MA} 는 식 (4)와 같은 기울기로 감소하게 된다.

$$\frac{di_{MA}}{dt} = \frac{V_{reset}}{n_2 L_{MA}} \quad (4)$$

또한 변압기의 자화 인덕턴스 L_m 도 전원측으로 리셋 된다.

4) MODE IV : $t_4 \leq t \leq t_5$

변압기의 자화 인덕턴스 L_m 이 여전히 전원측으로 리셋 되는 구간으로 모드 I에서처럼 인덕터 L2의 블록킹 시간을 제어하기 위해 자체 궤환루프에서 L2로 전류가 흐른다. 이 전류로 인해서 그림 2(a)의 $t_3 \sim t_6$ 까지의 시간을 조절하여 다음 주기의 자기 증폭기의 블록킹 시간을 제어한다.

5) MODE V : $t_5 \leq t \leq t_6$

변압기의 자화 인덕턴스 L_m 이 전원측으로 완전히 리셋된 구간으로 자기증폭기 L2는 다시 스위치 S1,S2,S3가 온 할 때까지 식(5)와 같은 전류가 흐른다.

$$i_{control} = \frac{H}{0.4\pi N} \quad (5)$$

2.1.2 자기증폭기의 해석

일반적으로 인덕턴스를 구하는 식은 식(2)로 나타낼 수 있다.

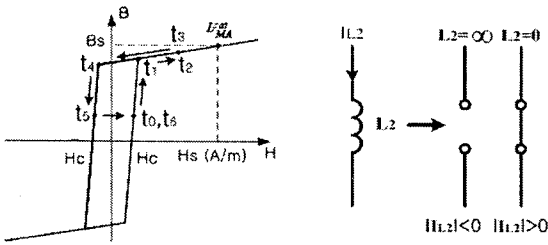
$$L_S = \mu \frac{N^2 S}{l}, \quad \mu = \begin{cases} \infty & \text{for } H=0 \\ 0 & \text{for } H \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

여기서, μ : 투자율

S : 코어의 단면적

N : 턴수

l : 코어의 평균 자로길이



(a)실제적인 B-H 커브 (b) 자기증폭기의 등가 모델
그림 4. 자기증폭기 모델링

이상적인 자성체는 두 가지 특성으로 나타낼 수 있다. 첫째 코어가 포화가 되지 않았을 때의 인덕턴스는 무한대이다. 둘째 코어가 포화 됐을 때 등가 인덕턴스는 0이다. 자기증폭기는 이러한 동작 특성을 이용한다.

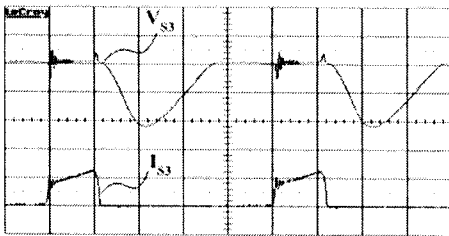
그림 4(a)는 실제 자성체의 B-H커브를 나타낸다. 그러나 자기증폭기에 적용되는 자성체는 보자력(H_c)이 작고 포화자속밀도(B_m)가 크므로 그림4(b)에서처럼 반도체 소자와 같은 스위칭 동작을 하게 된다. $t_2 \sim t_3$ 구간은 자성체가 포화되는 구간으로 임피던스는 영에 가까워 스위치 온 상태로 동작 하고, 나머지 구간에서는 자성체 양단의 전압이 인가되어 고임피던스가 되므로 스위치 오프 상태로 동작한다.

2.2 실험 결과

제안된 방식의 타당성을 검증하기 위해 100kHz, 270W 회로를 설계, 제작하여 실험 하였다. 설계 사양은 다음의 표 1과 같다.

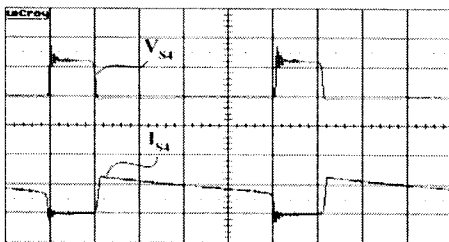
표 1. 설계사양

입력전압(V_i)	380~420[VDC]
스위칭 주파수(f_s)	100[kHz]
주출력(V_{o1})	5[V] / 0~30[A]
보조출력(V_{o2})	12[V] / 0~10[A]



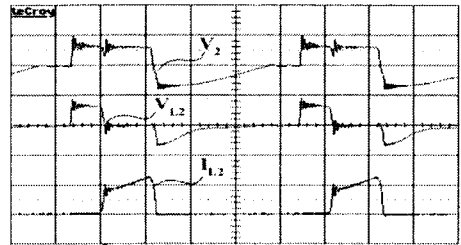
V_{S3} : 20[V]/div. I_{S3} : 5[A]/div. Time: 2[μ Sec]/div

그림 5. S3 전압, 전류파형



V_{S4} : 50[V]/div. I_{S4} : 5[A]/div. Time: 2[μ Sec]/div

그림 6. S4 전압, 전류파형



V_{L2}, V_{L2} : 100[V]/div. I_{L2} : 5[A]/div. Time: 2[μ Sec]/div

그림 7. L2 전압, 전류파형

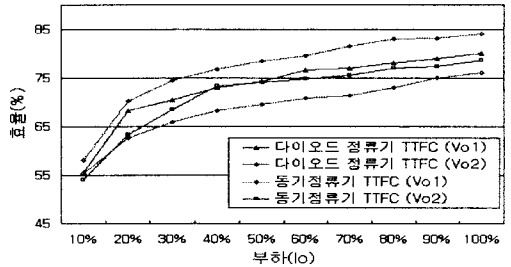


그림 8. 각 방식에 대한 효율비교

그림 5는 동기정류기 S3의 전압 및 전류파형을 나타낸다. 동기정류기 S3가 턴-온 구간에 자기증폭기에 의해 오프가 되는 구간이 생겨 전류가 흐르지 않는 것을 확인할 수 있다. 그림 6은 동기 정류기 S4의 전압, 전류 파형을 나타낸다. 그림 7은 2차측 전압 파형과 자기증폭기의 양단 전압 전류를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 그림 2의 이론파형과 실험 파형이 일치 하는 것을 볼 수가 있다. 그림 8은 일반적인 다이오드 정류 방식의 TTFC와 동기정류 방식의 TTFC의 효율을 비교한 결과이다. 제안된 컨버터의 효율이 개선 되었음을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 자기증폭기를 이용한 TTFC를 제안하였다. 제안된 컨버터는 1차측에 Two Transistor Forward Converter를 적용하여 1차측 스위치의 전압 스트레스를 저감하고 리셋 회로를 제거 하였으며, 2차측에 자기증폭기와 동기 정류기를 적용하여 보조 전원측의 도통손실을 줄여 효율을 높이고 부하단의 안정화가 이루어지는 것을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Taeyoung Ahn, Heejun Kim, and Koosuke Harada "Fixed frequency, fixed duty ratio controlled forward ZVS-MRC using a saturable core". Power Electronics Specialists Conference PESC 1993, pp. 551~557, JUNE 1993
- [2] Milan M. Jovanovic, and Laszlo Huber "Small-signal modeling of nonideal Magamp PWM switch". IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 14, Issue.5 pp. 882~889, Sept 1999
- [3] 김희준, "스위칭 전원의 기본설계", 성안당, 2002
- [4] 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
- [5] C. Jamerson and A. Hosseini, "Techniques for reduction of control loop interactions in Magamp supplies," Magnetics, Inc., Application Note, 1995