

Two transistor 포워드 DC-DC 컨버터의 효율 특성에 관한 연구

安泰榮[†], 李光澤*

A study on the efficiency characteristics for
two transistor Forward DC-DC converter

Tae-Young Ahn, Gwang-Taek Lee

요 약

본 논문에서는 Two transistor forward(TTF) DC-DC 컨버터의 회로방식에 대한 전력변환 효율특성을 빠르고 효과적인 분석 방법에 대해 보고한 것이다. TTF 컨버터의 회로 구성 소자 중에서 내부 기생저항만을 고려한 등가회로를 유도하고 이상적인 동작 파형을 이용하여 전류의 실효값과 전도손실을 유도하였다. 해석을 간단하게 하기 위해서 정상상태 결과로부터 코어 손실은 무시하였으며, 다이오드의 손실과 전도손실 만을 고려하였다. 해석결과의 타당성을 검토하기 위해서 시험용 TTF 컨버터를 구성하여 검증하였다. 입력전압 390V, 출력전압 12V, 최대전력 480W의 조건에서 실험결과와 해석결과와 비교적 잘 일치한다는 것을 본 논문에서 확인 하였다.

ABSTRACT

In this paper, we present an analytical method that provides fast and efficient evaluation of the conversion efficiency for Two transistor forward (TTF) DC-DC converter. In the proposed method, the conduction losses are evaluated by calculating the effective values of the ideal current waveform first and incorporating them into an exact equivalent circuit model of the TTF converter that includes all the parasitic resistances of the circuit components. While the conduction losses are accurately accounted for the diode rectification, the core losses are assumed to be negligible in order to simplify the analysis. The validity and accuracy of the proposed method are verified with experiments on a prototype TTF converter. An excellent correlation between the experiments and theories are obtained for the input voltages of 390V, output voltage 12V and maximum power 480W.

Key Words : Half bridge, two transistor forward, power conversion efficiency, conduction loss

1. 서 론

하프브릿지 컨버터는 두 개의 스위치를 사용하여 전력변환을 수행하기 때문에 한 개의 스위치를 사용하는 컨버터에 비해 비교적 많은 전력을

효율적으로 변환이 가능하다. 그러나 같은 수의 스위치를 사용하더라도 변환효율이나 정상특성이 다르기 때문에 전원장치의 설계 초기에 고려해야 할 기본 사항이 늘어나고 우열을 판단할 수 있는 객관적인 판단의 자료가 복잡해지는 경향이 있다. 또한, 하프브릿지 컨버터는 두 개의 스위치를 사용하여 전력을 분담하고, 스위치의 정격전압이 다른 회로방식에 비해 낮기 때문에 낮은 전도손실 특성의 반도체 스위치를 이용할 수 있고, 결과적으로는 전력변환 효율을 개선시켜 시스템의

[†]교신저자 : 정회원, 청주대 전자정보공학부 부교수

E-mail : tyahn@cju.ac.kr

*정회원 : 청주대학교 대학원 석사과정

접수일자 : 2006. 12. 4

1차 심사 : 2006. 12. 26

2차 심사 : 2007. 1. 13

심사완료 : 2007. 1. 19

신뢰성을 향상시켜준다.^[1,2]

본 논문에서는 고효율, 소형, 박형화가 요구되는 스위칭 전원장치에서 비교적 중대형 용량에서 사용되는 하프브릿지 계열인 Two transistor forward (TTF)컨버터의 효율특성에 대해 비교 분석한 결과를 보고하였다. TTF 컨버터는 두 개의 스위치를 사용하여 입력전압을 분담하기 때문에 스위치의 정격전압이 다른 회로방식에 비해 낮고, 변압기의 리셋 기능이 다이오드에 의해 간단히 구현되는 등, 결과적으로는 전력변환 효율을 개선시켜 시스템의 신뢰성을 향상시켜준다.

본 논문에서는 TTF 컨버터의 효율특성 해석을 위해서, 내부 손실이 없는 이상적인 등가회로에 대한 정상상태 해석을 수행하였다. 정상상태 결과로부터 주요 부분의 실효전류를 유도하여 전도손실을 정량화 시켰으며, 그 결과를 내부 기생 저항을 고려한 등가회로에 반영하여 전력손실과 전력변환 효율을 구하였다. 해석결과의 타당성을 검토하기 위해서 이론 및 실험결과를 비교하였다. 실험 컨버터는 입력전압 390V, 출력전압 12V, 최대전류 40A, 최대전력 480W로 설계하였다.

2. TTF 컨버터의 기본 특성

2.1 정상상태 특성

그림 1은 TTF 컨버터의 기본회로를 나타내었다. 그림 2에는 그림 1의 기본 회로에 대한 내부 손실이 없는 이상적인 등가회로를 나타내었다. 즉, 스위치와 다이오드는 모두 이상적인 스위치로서 동작한다고 가정하였으며, 변압기는 자화인덕턴스만 고려하였고 누설인덕턴스는 무시하였다. 또한 권선비를 고려하여 2차측 회로를 1차측으로 변환하였다. 변압기와 직렬로 연결된 다이오드는 정상상태에서 자동 리셋기능을 수행하고 있다.

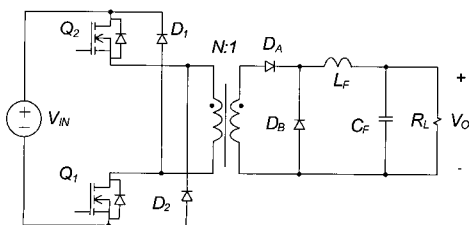


그림 1 TTF 컨버터의 기본회로
Fig. 1 Basic topology of TTF converter

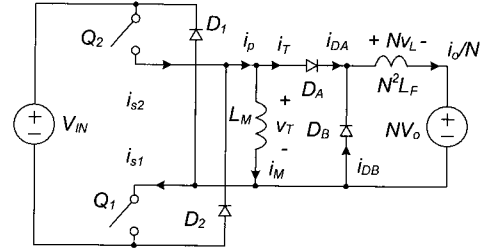


그림 2 TTF 컨버터의 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of TTF converter

그림 3은 정상상태에서 TTF 컨버터가 동작하는 경우 주요부분의 이론파형을 나타낸 것이다. 회로의 동작에서 컨버터의 특징을 가장 잘 나타낼 수 있는 부분이 변압기의 전류라고 판단되며 본 논문에서는 변압기의 전류를 중심으로 동작설명을 하였다. 먼저 그림 3의 TTF 컨버터는 두 개의 주 스위치가 온 상태가 되면 변압기의 자화전류가 선형으로 증가하고 스위치에 흐르는 전류는 출력전류가 권선비 만큼 더해져서 흐르게 된다. 주스위치가 오프 상태가 되면 변압기는 음의 전압이 걸리고 따라서 직선으로 감소하며 리셋 다이오드를 통해 감소된 전류가 흐르게 된다. 자화전류가 감소되어 리셋 전류가 0이 되면 변압기의 리셋동작이 완료되고 다음 스위치 도통 상태를 기다리게 된다. 따라서 TTF 컨버터는 변압기의 리셋기간이 필요하기 때문에 최대 시비율은 0.5로 제한된다.^[3,4]

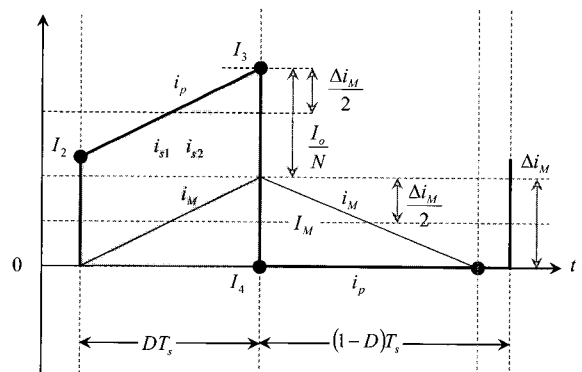


그림 3 TTF 컨버터의 동작파형
Fig. 3 Operational waveforms of TTF converter

그림 3의 정상상태 파형과 동작설명으로부터 컨버터의 입출력 전압비 M 은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 변압기 자화인덕터 L_M 에 흐르는 전류의 변화량

Δi_M 은 식 (2)와 같이 나타나며, 자화전류의 평균값 I_M 은 식 (3)과 같다. 식에서 D 는 시비율이며, T_S 는 스위칭 주기, N 은 변압기 권선비이다. 또한 등가회로의 각 부분에 흐르는 전류의 실효값을 구하고 그 결과를 표 1에 나타내었다. 등가회로에서 내부손실을 고려하지 않았기 때문에 전류의 실효값이 비교적 간단하게 유도되었으며 특히 두 개의 스위치는 동시에 온 오프를 수행하기 때문에 실효 전류값이 동일하다.

$$M = N \frac{V_O}{V_{IN}} = D \tag{1}$$

$$\Delta i_M = \frac{DV_{IN}T_S}{L_M} \tag{2}$$

$$I_M = \frac{DV_{IN}T_S}{2L_M} \tag{3}$$

표 1 TTF 컨버터 전류의 실효값
Table 1 RMS current values for TTF converter

Parameter	RMS values
$I_{S1,2RMS}$	$\sqrt{D \left[\left(\frac{I_o}{N} + \frac{V_{IN}DT_S}{2L_M} \right)^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{V_{IN}DT_S}{L_M} \right)^2 \right]}$
I_{PRMS}	$\sqrt{D \left[\left(\frac{I_o}{N} + \frac{V_{IN}DT_S}{2L_M} \right)^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{V_{IN}DT_S}{L_M} \right)^2 \right] + (1-D) \frac{1}{3} \left(\frac{V_{IN}DT_S}{L_M} \right)^2}$
I_{DARMS}	$\sqrt{D} \sqrt{I_o^2 + \frac{\Delta I_F^2}{12}}$
I_{DBRMS}	$\sqrt{(1-D)} \sqrt{I_o^2 + \frac{\Delta I_F^2}{12}}$
$I_{LF RMS}$	$\sqrt{I_o^2 + \frac{\Delta I_F^2}{12}}$

2.2 손실특성 분석

일반적으로 스위칭 전원장치의 손실 중에서 가장 많은 비중을 차지하고 있는 소자가 정류용 다이오드라고 알려져 있다. 본 논문에서는 손실분석을 위해서 출력전류 변화에 대한 다이오드 손실을 정량적으로 평가하기 위해서 전류에 대한 다이오드의 순방향 전압을 식으로 구하였다. 그림 4에는 실험에서 사용될 정류용 다이오드인 S60SC6M에 대한 전류와 순방향 전압을 그래프로 나타내었다. 그림에서 흑점은 제조사에서 제공한 데이터이며, 실선은 각 점에 대해 커브 피팅을 수행한 후 함수로 표현된 결과를 나타낸 것이다. 식 (4)는 커브 피팅 결과에 의해 얻어진 전류와 순방향 전압과의

관계를 나타낸 것이다.

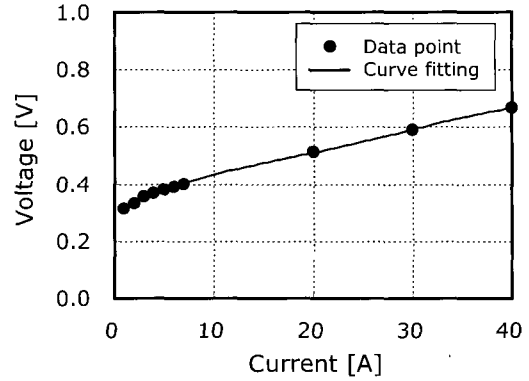


그림 4 정류용 다이오드의 전류와 순방향전압 특성
Fig. 4 Characteristics of current and voltage for rectifier diode

$$V_D = -3 \times 10^{-7} I_D^4 + 3 \times 10^{-5} I_D^3 - 10^{-3} I_D^2 + 21 \times 10^{-3} I_D + 0.3 \tag{4}$$

본 논문에서 검토하고 있는 TTF 컨버터에 대한 손실특성을 검토하기 위해서는 회로 내부에서 손실이 발생하는 기생저항을 포함 시켜야 한다. 본 논문에서는 그림 2의 이상적인 등가회로의 주요 부위에 내부저항을 고려한 등가회로를 그림 5에 나타내었다. 그림 5의 등가회로와 표 1의 정상상태 전류실효값을 이용하여 주요 부분의 실효 전류값을 구하였다. 그림 5의 등가회로 내부 저항과 표 1의 실효전류에 의한 전도손실과 다이오드 전도손실이 컨버터의 내부손실을 구성한다는 것을 알 수 있으며 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_{Loss} = \sum I_{RMS}^2 \times r + V_D \times I_o \tag{5}$$

비교를 위하여 다음과 같은 전기적 사양을 정하여 적용하였다. TTF 컨버터의 입력전압은 390V, 출력전압은 12V, 최대전류는 40A, 최대전력은 480W, 스위칭 주파수는 70kHz로 가정 하였다. 부하전류 변화에 대한 실효 전류값을 구하기 위해서 내부 저항과 각 주요 소자에 대한 정수값을 설계할 필요가 있는데 표 2에는 계산에서 사용된 소자의 기생저항과 변수를 나타내었다. 변압기의 자화 인덕턴스는 5.0mH이며, 출력 필터용 인덕터의 인덕턴스는 40μH이다. 특히 컨버터에서 스위치와 보호회로에서 사용된 제어회로의 소비전력은 약 6.0W라고 가정하였다. 그림 6에서는 스위치와 변압

기의 실효 전류값을 계산하여 나타내었다. 계산에서 사용된 각 소자와 내부 기생저항 값은 표 2의 파라메타를 이용하였다. 그림 6은 TTF에서 변압기 1차측에 위치한 두 개의 주 스위치에 흐르는 전류의 실효값을 나타낸 것이다. 그림에서 부하전류에 대해 전류값이 비례하고 있으며, 변압기 전류도 마찬가지로 부하전류가 최대 40A에서 약 2A의 실효전류가 흐르고 있다.

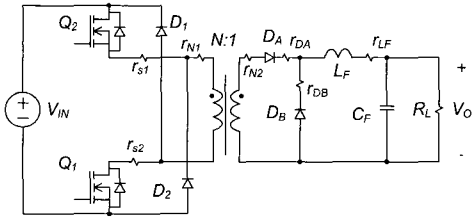


그림 5 내부저항을 고려한 TTF 컨버터의 등가회로
Fig. 5 Equivalent circuit of TTF converters with parasitic resistor

표 2 회로의 파라메타
Table 2 Parameters of circuit

Parameters		Unit	value
Magnetizing inductance	L_M	mH	5.0
Filter inductance	L_F	μ H	40
SW S_1 resistor	r_{s1}	m Ω	70
SW S_2 resistor	r_{s2}	m Ω	70
N_1 resistor	r_{N1}	m Ω	5
N_2 resistor	r_{N2}	m Ω	1
Inductor resistor	r_{LF}	m Ω	5
D_A resistor	r_{DA}	m Ω	5
D_B resistor	r_{DB}	m Ω	5
Control power loss	P_c	W	6.0

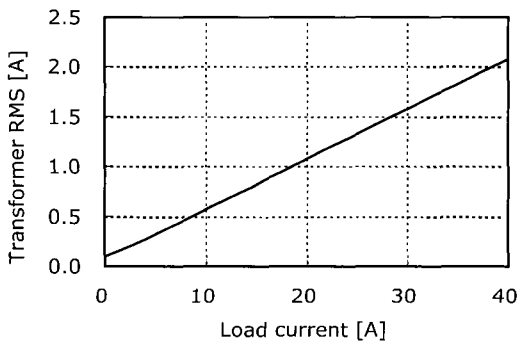


그림 6 스위치와 변압기의 전류 실효값
Fig. 6 RMS current for switch and transformer

3. 실험 결과

본 논문에서는 앞 절에서 TTF 컨버터의 실효전류와 내부손실을 고려한 등가회로를 이용하여 이론 손실과 효율을 구하고, 실험결과와 비교하여 타당성을 확인하였다. 그림 7에 실험회로를 나타내었다. 실험 회로에 대한 전기적 특성은 앞 절과 동일하게 설계하였으며, 제어 회로는 전류 제어용 PWM 소자로 널리 사용되고 있는 UC3845이며, 주 스위치는 페어차일드사의 FCA20N60S이며 정격전압600V 정격전류 60A 내부저항 0.22 Ω 이다. 변압기는 EER42, 리셋 다이오드는 FRD이며 UF4007, 2차측 정류용 다이오드는 60V, 60A급 쇼트키 다이오드 S60SC6M를 두 개 사용하여 전도 손실을 저감시켰다.

그림 8은 TTF 컨버터의 출력 전류가 1A, 40A 일 때의 주요 파형을 나타낸 것이다. 그림에서 주 스위치의 게이트 구동 전압 V_{GS} , 스위치 전압 V_{DS} , 스위치 전류 I_p 와 2차측 정류 다이오드의 전압 V_{CA} 을 나타내었다. 그림 8(a)에서 부하전류가 1A일 때 인덕터 전류가 불연속전류 구간에 있기 때문에 스위치 전압이 턴 오프 구간에서 공진하고 있지만 정상적인 스위칭이 되고 있다는 것을 알 수 있다. 부하전류가 40A에서는 스위치의 제어전압에 의해 스위칭 되면서 변압기가 정상적으로 리셋 되고 있다는 것을 알 수 있다.

그림 9는 TTF 컨버터의 효율과 손실특성 그래프를 나타낸 것이다. 그림 9(a)에서 TTF 컨버터의 손실특성을 실험회로에서 측정된 실험 결과와 앞 절에서 유도된 식 (5)의 이론 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 실험에서 측정된 손실은 실험회로의 입력과 출력에 요코가와 WT1600 모델의 파워미터를 설치하여 얻은 결과를 연산하였다. 그림 9(b)에서는 전력변환 효율을 비교한 것이다.

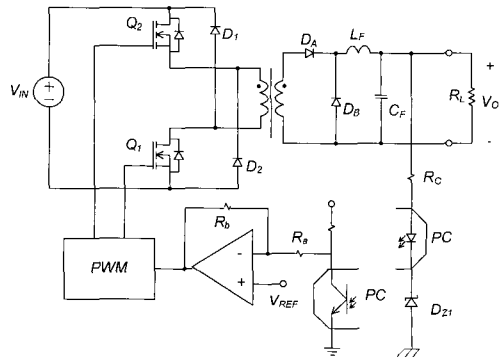
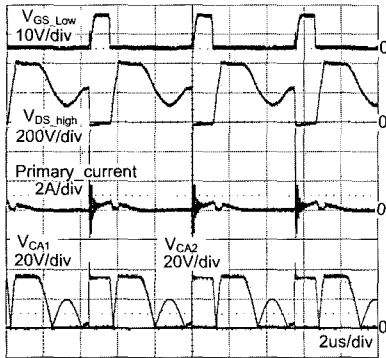
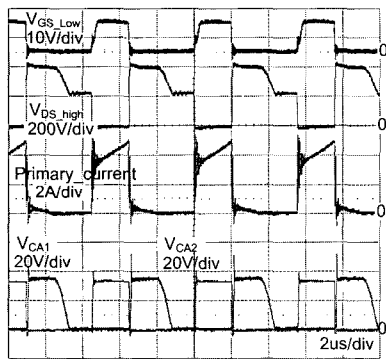


그림 7 실험 회로
Fig. 7 Experimental circuit

그림으로부터 전체 부하 범위에 걸쳐서 실험결과와 이론결과가 비교적 잘 일치하고 있으며 특히 이론 효율이 실험 효율에 비해 전체적으로 높게 나타나 있음을 알 수 있다. 이것은 컨버터의 스위칭 손실과 변압기와 인덕터의 코어 손실 등이 포함되어 있지 않기 때문이라고 판단된다.

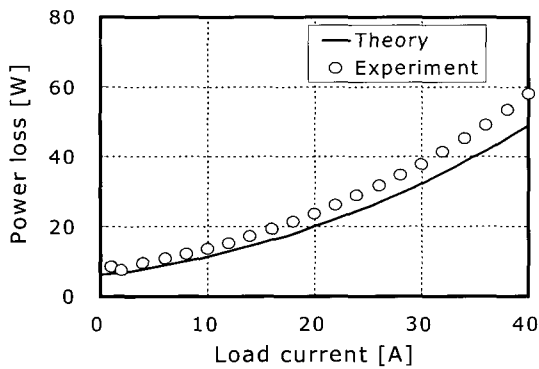


(a) $I_0 = 1A$

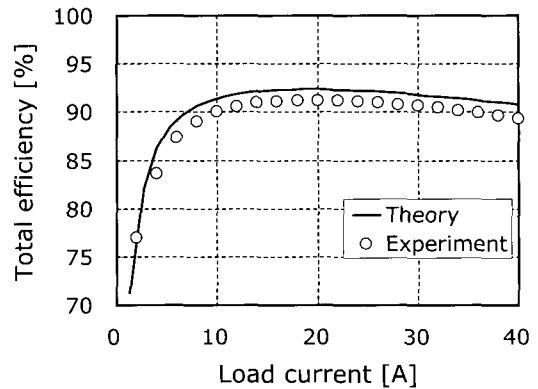


(c) $I_0 = 40A$

그림 8 실험 파형
Fig. 8 Experimental key waveforms



(a) Total power losses



(b) Total power conversion efficiency

그림 9 이론과 실험 효율 특성그래프
Fig. 9 Efficiency characteristics graph for theory and experiment

4. 결 론

본 논문에서는 Two transistor forward 컨버터의 회로방식에 대한 효율특성을 분석한 것이다. 해석을 간단하기 위해서, 내부 손실이 없는 이상적인 등가회로에 대한 정상상태 해석을 수행하였다. 정상상태 결과로부터 주요 부분의 실효전류를 유도하여 전도손실을 정량화 시켰으며, 그 결과를 내부 기생저항을 고려한 등가회로에 반영하여 전력손실과 전력변환 효율을 구하였다. 해석결과의 타당성을 검토하기 위해서 이론 및 실험의 손실특성과 효율특성을 비교하였다. 실험과 이론해석에서 사용된 컨버터는 입력전압 390V, 출력전압 12V, 최대전류 40A, 최대전력 480W로 하였다. 실험결과는 해석결과와 비교적 잘 일치하여 정상상태 해석결과 및 효율 분석이 타당하다는 것을 본 논문에서 확인 하였다.

감사의 글

본 연구는 삼성전기주식회사 P&M사업부의 연구비 지원에 의해 수행된 연구결과의 일부이며 관계자 여러분께 심심한 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

[1] Wilson Eberle, Yongtao Han, Yan-Fei Liu and Sheng

- Ye, "An Overall Study of the Asymmetrical Half-Bridge with Unbalanced Transformer Turns under Current Mode Control", IEEE PESC, 2004, pp. 1083-1089.
- [2] J.-J. Shieh, "Realisation of the zero-voltage switching condition for asymmetrical half-bridge DC/DC forward converters", IEEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 153, No. 1, pp. 23-30, January 2006.
- [3] Yilei Gu and Huiming Chen and Zhengyu Lu and Zhaoming Qian and Kun Wei "A family of asymmetrical dual switch forward DC-DC converters" IEEE Volume 3, 6-10 March 2005 Page 1556 - 1560 Vol. 3
- [4] Min Chen and Dehong Xu and Matsui, M "Study on magnetizing inductance of high frequency transformer in the two-transistor forward converter" Power Conversion Conference, 2002. PCC Osaka 2002. Proceedings of the Volume 2,2-5 April 2002 Page. 597-602 vol. 2

저 자 소 개



안태영(安泰英)

1984년 한양대 전자공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 큐슈대학교 전자공학(공학박). 1995년 일본 세이코 전기 선임연구원. 1996년 삼성전자 반도체 선임연구원. 1997년~현재 청주대 전자정보공학부 부교수. 당 학회 학술이사.



이광택(李光澤)

1977년 10월 22일생. 2005년 청주대 전자공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전자공학과 졸업예정(석사). 2005년~현재 청주대 대학원 전자공학과 석사과정.