

하프브릿지형 DC-DC 컨버터의 효율특성 비교에 관한 연구

이광택[§], 안태영[§], 김성철^{**}, 유병우^{**}, 봉상철^{**}
 청주대학교 전자공학과, 삼성전기 P&M사업부 Power사업팀

A study on comparison of efficiency characteristics for half bridge type DC-DC converters

Kwangtek Lee[§], Taeyoung Ahn[§], Sungcheol Kim^{**}, Byoungwoo Ryu^{**}, Sangcheol Bong^{**}
 Cheongju Univ. Dept. of electronics eng., Samsung Electro-mechanics Co., LTD.

ABSTRACT

This paper presented the power losses comparison results with the Active clamp Forward, the Asymmetrical half bridge and the Two transistor forward converters. To estimate for conduction losses in the converters, the steady state analysis regard to parasitic resistance and current effective values for main parts of converters was derived. In addition, the theoretical efficiency for the converters with input voltage 400V, output voltage 12V and maximum power 480W was discussed.

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 고려해야할 기본 사항이 늘어나고 우열을 판단할 수 있는 객관적인 판단의 자료가 복잡해지는 경향이 있다.

본 논문에서는 고효율, 소형, 박형화가 요구되는 스위칭 전원장치에서 비교적 중대형 용량에서 사용되는 하프브릿지 계열의 DC-DC 컨버터의 효율특성에 대해 비교 분석한 결과를 보고하였다. 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 신뢰성을 향상시켜준다. 본 논문에서는 하프브릿지 계열의 컨버터 중에서 3개의 회로방식에 대한 정상상태 해석을 수행하였으며, 주요부분의 실효전류를 유도하여 전도손실을 정량화 시키고 그 결과를 이론효율에 반영하여 예측할 수 있도록 하였다. 객관적인 비교 수행을 위해서 각 컨버터의 입력전압은 400V, 출력전압은 12V, 최대전류는 40A, 최대전력은 480W로 동일한 사양으로 계산하였다.

2. 하프브릿지 컨버터의 기본특성

2.1 정상상태 특성

그림 1에는 본 논문에서 검토하고 있는 하프브릿지 컨버터의 기본회로가 나란 있다. 그림 1(a)는 일반적으로 비대칭 하프

브릿지 컨버터로 알려진 AHB(Asymmetrical Half bridge), 그림 1(b)는 컴퓨터 또는 서버용 전원으로 널리 이용되고 있는 TTF(Two transistor forward) 컨버터, 그림 1(c)는 능동클램프 파워드 컨버터로 알려진 ACF(Active clamp forward) 컨버터이다. TTF와 ACF는 파워드 컨버터에서 변형된 회로방식이기는 하지만 본 논문에서는 두 개의 스위치로 구성할 수 있는 컨버터의 관점에서 하프브릿지 계열로 분류하였다.^[1]

그림 2에는 그림 1의 기본 회로에 대한 등가회로를 나타내었다. 스위치와 다이오드는 모두 이상적인 스위치로서 동작한다고 가정하였으며, 변압기는 자화인덕턴스만 고려하였고 누설 인덕턴스는 모두 무시하였다. 또한 출력의 커패시터가 크다고 가정하여 정상상태에서 정전압으로 등가 하였다. 그림 2(a)의 배전압 정류기를 제외한 그림 2(b), (c)의 싱글 엔드 정류기는 변압기의 권선비를 고려하여 2차측 회로를 1차측으로 변환하였다. 변압기와 직렬로 연결된 커패시터는 정상상태에서 자동 리셋기능을 수행하고 있으며 그 결과 정전압으로 변환할 수 있었다.

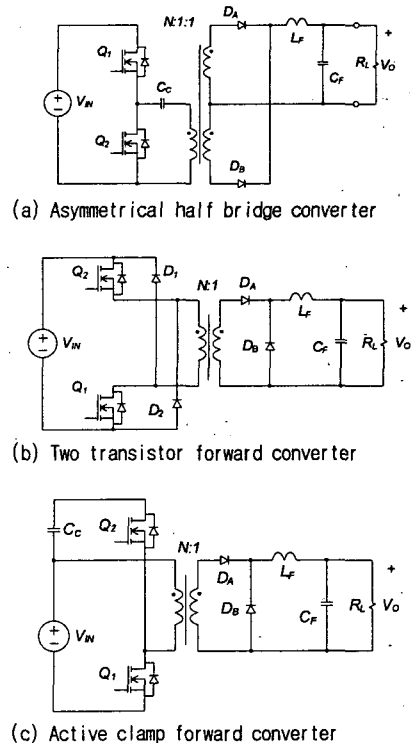
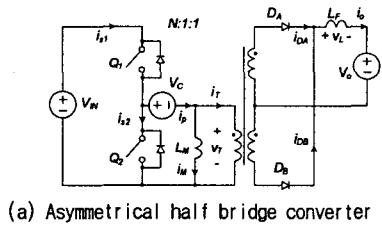


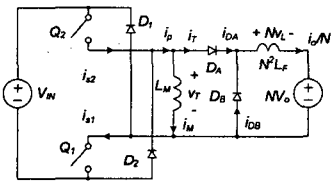
그림 1 하프브릿지형 컨버터의 기본회로
 Fig. 1 Basic topology of half bridge type converters

그림 3은 정상상태에서 각 회로들이 동작하는 경우 주요부분의 이론파형을 나타낸 것이다. 회로의 동작에서 컨버터의 특징을 가장 잘 나타낼 수 있는 부분이 변압기의 전류라고 판단하여 본 논문에서는 변압기의 전류를 중심으로 나타내었다. 그림 3(a)에서 알 수 있듯이 AHB 컨버터는 주 스위치가 ON 상태가 되면 변압기의 자화전류가 선형으로 증가하고 스위치에 흐르는 전류는 출력전류가 권선비만큼 더해져서 흐르게 된다. 주 스위치가 OFF되면 변압기는 음의 전압이 걸리고 따라서 직선으로 감소하며 보조스위치를 통해 감소된 전류가 커패시터를 통해서 흐르게 된다. AHB 컨버터의 특징은 커패시터에 흐르는 전류의 평균값이 0이 되며 따라서 주스위치와 보조 스위치의 전류 평균값이 항상 같다. 그림 3(b)의 TTF 컨버터는 주스위치가 흐르는 전류는 AHB 컨버터와 같은 상황이 되지만 주스위치가 OFF 되면 변압기의 리셋동작에 의해 자화전류가 감소되어 0가 된다. 그림 3(c)의 ACF 컨버터는 변압기와 직렬로 구성된 능동클램프용 커패시터 때문에 자화전류의 평균값이 0이 되며, 그림과 같이 주스위치가 턴온 되기 직전에 음의 전류가 형성되기 때문에 ZVS(zero voltage switching)이 가능하다.

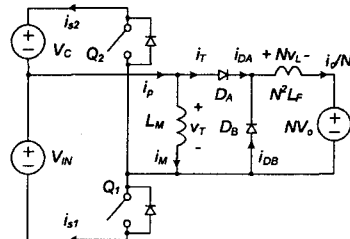
표 1에는 정상상태에서 각 회로방식에 대한 결과식을 정리한 것이다. 표에서 AHB 컨버터의 입력전압과 출력전압비는 시비율의 2차방정식으로 표현되기 때문에 0과 1을 교점으로 하는 최대값을 갖는 그래프라는 것을 알 수 있다. 표에서는 최대 시비율은 0.5로 제한된다. TTR 컨버터의 경우에는 시비율과 전압이득이 비례하지만 실제로는 변압기의 리셋기간이 필요하기 때문에 최대 시비율은 AHB 컨버터와 마찬가지로 0.5로 제한된다. ACF 컨버터의 경우에는 원리적으로 시비율의 제약이 없는 것으로 알려져 있다.^[2]



(a) Asymmetrical half bridge converter



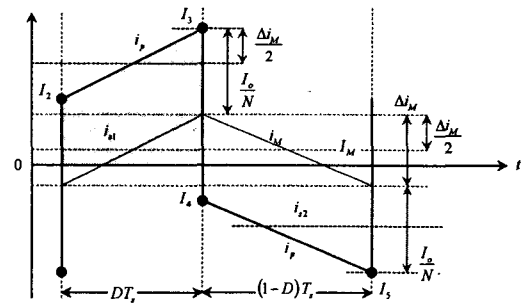
(b) Two transistor forward converter



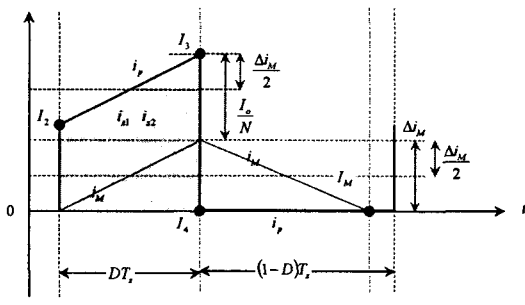
(c) Active clamp forward converter

그림 2 하프브릿지형 컨버터의 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of half bridge type converters

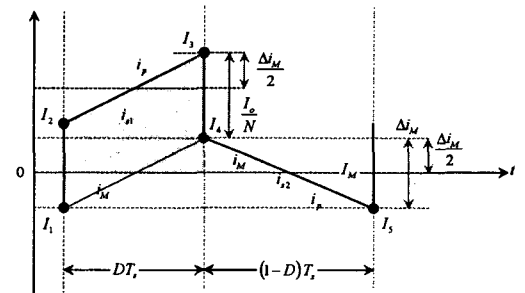
표 2, 3, 4에는 AHB, TTR, ACF 컨버터에 대한 주요부분에 대한 전류의 실효값을 정리하여 나타낸 것이다.



(a) Asymmetrical half bridge converter



(b) Two transistor forward converter



(c) Active clamp forward converter

그림 3 하프브릿지형 컨버터의 동작파형
Fig. 3 Operational waveforms of half bridge type converters

표 1 정상상태 특성식
Table 1 Characteristics equations for steady state

	AHB	TTR	ACF
V_c	DV_{IN}		$\frac{D}{(1-D)}V_{IN}$
$M = \frac{NV_o}{V_{IN}}$	$2D(1-D)$	D	D
Δi_M	$\frac{D(1-D)V_{IN}T_s}{L_M}$	$\frac{DV_{IN}T_s}{L_M}$	$\frac{DV_{IN}T_s}{L_M}$
I_M	$\frac{I_o}{N}(1-2D)$	$\frac{DV_{IN}T_s}{2L_M}$	0
Δi_F	$\frac{D(1-D)(1-2D)V_{IN}T_s}{NL_F}$	$\frac{D(1-D)V_{IN}T_s}{NL_F}$	$\frac{D(1-D)V_{IN}T_s}{NL_F}$

표 2 AHB 컨버터 전류의 실효값

Table 2 RMS current values for AHB converter

Param.	RMS values
$I_{I1,RMS}$	$\sqrt{D \left[2(1-D) \frac{I_o}{N} \right]^2 + \frac{1}{48} \left(\frac{N V_o T_s}{L_M} \right)^2}$
$I_{I2,RMS}$	$\sqrt{(1-D) \left[2D \frac{I_o}{N} \right]^2 + \frac{1}{48} \left(\frac{N V_o T_s}{L_M} \right)^2}$
I_p,RMS	$\sqrt{D \left[2(1-D) \frac{I_o}{N} \right]^2 + \frac{1}{48} \left(\frac{N V_o T_s}{L_M} \right)^2} + \sqrt{(1-D) \left[2D \frac{I_o}{N} \right]^2 + \frac{1}{48} \left(\frac{N V_o T_s}{L_M} \right)^2}$
$I_{DA,RMS}$	$\sqrt{D} \sqrt{I_o^2 + \frac{\Delta I_F^2}{12}}$
$I_{DB,RMS}$	$\sqrt{(1-D)} \sqrt{I_o^2 + \frac{\Delta I_F^2}{12}}$
$I_{LF,RMS}$	$\sqrt{I_o^2 + \frac{\Delta I_F^2}{12}}$

표 3 TTR 컨버터 전류의 실효값

Table 3 RMS current values for TTR converter

Param.	RMS values
$I_{I1,RMS}$	$\sqrt{D \left[\left(\frac{I_o}{N} + \frac{V_o D T_s}{2 L_M} \right)^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{V_o D T_s}{L_M} \right)^2 \right]}$
$I_{I2,RMS}$	$\sqrt{D \left[\left(\frac{I_o}{N} + \frac{V_o D T_s}{2 L_M} \right)^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{V_o D T_s}{L_M} \right)^2 \right]}$
I_p,RMS	$\sqrt{D \left[\left(\frac{I_o}{N} + \frac{V_o D T_s}{2 L_M} \right)^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{V_o D T_s}{L_M} \right)^2 \right]} + \sqrt{(1-D) \frac{1}{3} \left(\frac{V_o D T_s}{L_M} \right)^2}$
$I_{DA,RMS}$	$\sqrt{D} \sqrt{I_o^2 + \frac{\Delta I_F^2}{12}}$
$I_{DB,RMS}$	$\sqrt{(1-D)} \sqrt{I_o^2 + \frac{\Delta I_F^2}{12}}$
$I_{LF,RMS}$	$\sqrt{I_o^2 + \frac{\Delta I_F^2}{12}}$

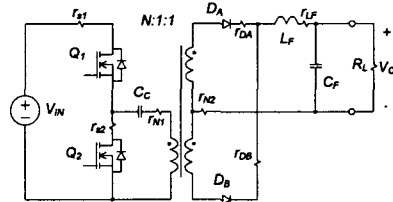
표 4 ACF 컨버터 전류의 실효값

Table 4 RMS current values for ACF converter

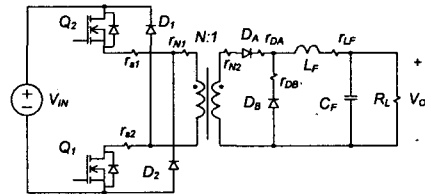
Param.	RMS values
$I_{I1,RMS}$	$\sqrt{D \left[\left(\frac{I_o}{N} \right)^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{V_o D T_s}{L_M} \right)^2 \right]}$
$I_{I2,RMS}$	$\left(\frac{V_o D T_s}{L_M} \right) \sqrt{\frac{(1-D)}{3}}$
I_p,RMS	$\sqrt{D \left[\left(\frac{I_o}{N} \right)^2 + \frac{1}{12} \left(\frac{V_o D T_s}{L_M} \right)^2 \right]} + \sqrt{(1-D) \frac{1}{3} \left(\frac{V_o D T_s}{L_M} \right)^2}$
$I_{DA,RMS}$	$\sqrt{D} \sqrt{I_o^2 + \frac{\Delta I_F^2}{12}}$
$I_{DB,RMS}$	$\sqrt{(1-D)} \sqrt{I_o^2 + \frac{\Delta I_F^2}{12}}$
$I_{LF,RMS}$	$\sqrt{I_o^2 + \frac{\Delta I_F^2}{12}}$

2.2 손실특성 분석

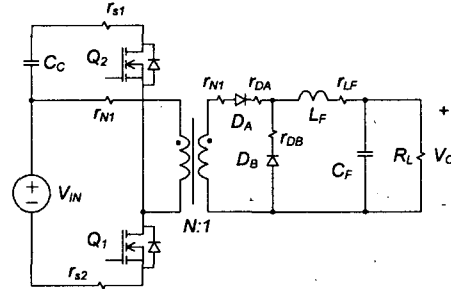
본 논문에서 검토하고 있는 3가지 방식의 하프브릿지 계열의 컨버터에 대한 손실특성을 비교하기 위해서 회로 내부에서 전도손실 유발하는 주요부위에 기생저항을 고려하여 그림 4의 회로에 나타내었다. 각 컨버터에 대한 객관적인 전도손실의 비교 수행을 위해서 다음과 같은 전기적 사양을 정하여 적용하였다. 입력전압은 400V, 출력전압은 12V, 최대전류는 40A, 최대전력은 480W, 스위칭 주파수는 100kHz로 하였다. 표 5에는 계산에 사용된 각 내부 파라메타를 정리하여 나타내었다.



(a) Asymmetrical half bridge converter



(b) Two transistor forward converter



(c) Active clamp forward converter

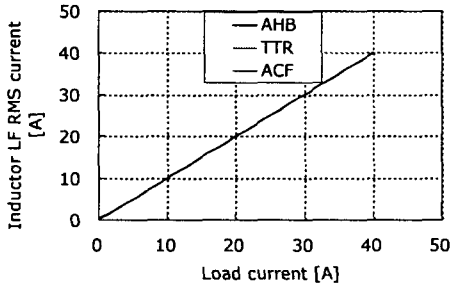
그림 4 내부저항을 고려한 하프브릿지형 컨버터의 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuit of half bridge type converters with parasitic resistor

표 5 회로의 파라메타

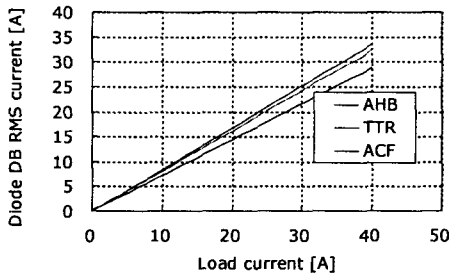
Table 5 Parameters of circuit

Parameters	Unit	value
Magnetising inductance	L_M	mH 8.0
Filter inductance	L_F	uH 50
SW S1 resistor	r_{s1}	mΩ 70
SW S2 resistor	r_{s2}	mΩ 70
N1 resistor	r_{N1}	mΩ 80
N2 resistor	r_{N2}	mΩ 8
Inductor resistor	r_{LF}	mΩ 3
Diode voltage drop	V_F	V 0.5
DA resistor	r_{DA}	mΩ 5
DB resistor	r_{DB}	mΩ 5
Undefine power loss	P_u	W 6.0

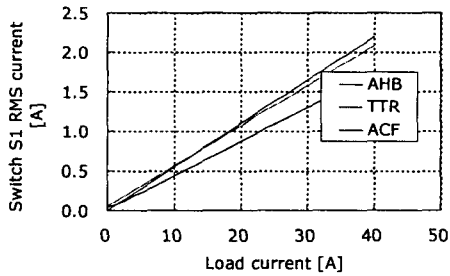
그림 5에는 그림 4의 손실을 고려한 기본회로에서 동일한 사양의 상황에서 계산된 각 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 그림 5(a)는 출력 인덕터 전류의 실효값을 나타낸 것이다. 출력에 리플전류를 고려하지 않은 상태에서는 같은 전류가 흐르기 때문에 세 가지 방식의 출력전류에 대한 실효값은 동일하다는 것을 알 수 있다. 그림 5(b)에서는 2차측 정류기로 사용된 다이오드 DA 전류의 실효값을 나타낸 것이다. 세 가지 방식 중에서 ACF 컨버터가 가장 작다는 것을 알 수 있다.



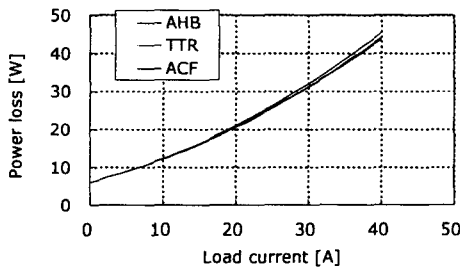
(a) RMS current of inductor



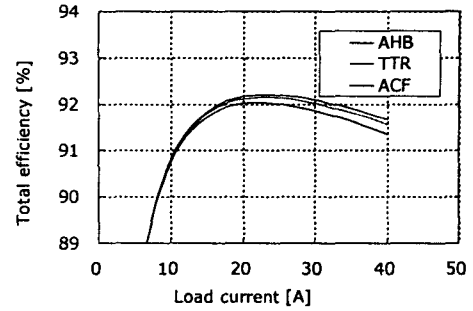
(b) RMS current of Diode DB



(c) RMS current of switch S1



(d) Total power losses



(e) Total power conversion efficiency

그림 5 특성그래프

Fig. 5 Characteristics graph for Half bridge type converters

그림 5(c)에는 스위치 전류에 대한 실효값을 나타낸 것이며 그림 5(d)에서는 세 가지 방식의 전력손실을 나타낸 것이다. 또한 그림 5(e)는 세 가지 방식의 전력변환 효율을 나타낸 것이다. 그림에서 전력변환 효율이 최대가 되는 점은 부하전류가 약 25A에서 나타나며 최대부하 전류에서 모두 91% 이상의 높은 효율을 나타내고 있다. 본 논문에서 검토하고 있는 사양의 컨버터의 경우 그림의 결과로부터 AHB 컨버터의 경우가 가장 높은 효율을 나타내고 있음을 알 수 있다.

3. 결론

본 논문은 고효율, 소형, 박형화가 요구되는 스위칭 전원 장치에서 비교적 중대형 용량에서 사용되는 하프브릿지 계열의 DC-DC 컨버터 중에서 최근 주목을 받고 있는 Active clamp Forward, Asymmetrical Half bridge, Two TR Forward 컨버터 등 총 3개의 회로방식이었으며 손실 계산을 위해서 우선 정상상태 해석을 수행하였으며, 주요부분의 실효전류를 유도하여 전도손실을 정량화 시키고 그 결과를 이론효율에 반영하여 예측할 수 있도록 하였다.

객관적인 비교 수행을 위해서 각 컨버터의 입력전압은 400V, 출력전압은 12V, 최대전류는 40A, 최대전력이 480W인 회로를 검토하였다. 검토 결과 전력변환 효율이 최대가 되는 점은 부하전류가 약 25A에서 나타나며 최대부하 전류에서 모두 91% 이상의 높은 효율을 나타내고 있다. 또한 본 논문에서 검토하고 있는 사양의 컨버터의 경우 AHB 컨버터의 경우가 가장 높은 효율을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

본 연구는 산업 자원부·한국산업기술평가원 지정 첨주대학교 정보통신 연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고 문헌

- [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", IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 153, No. 1, pp. 23-30, January 2006.