

IM(Integrated Magnetics)방식을 적용한 ZVS 하프브리지 컨버터에 관한 연구

이대혁^{*} · 김 용^{*} · 배진용^{*} · 김필수^{***} · 조규만^{***}

^{*}동국대학교, ^{**}대림대학, ^{***}청주기능대학

A study on ZVS Half-Bridge converter Using IM(Integrated Magnetics)

Dae-Hyuk Lee^{*} · Yong Kim^{*} · Jin-Yong Bae^{*} · Pill-Soo Kim^{***} · Gyu-Man Cho^{***}

^{*}Dongguk University, ^{**}Daelim College, ^{***}Chongju Polytechnic College

Abstract - This paper present ZVS Half-Bridge converter Using IM(Integrated Magnetics). In converter system, magnetic components are important devices used for energy storage, energy transfer, galvanic isolation and filtering. The purposes of IM (Integrated Magnetics) are to reduce the number of magnetic components and voltage/current ripple. This topology is use of three magnetics components thus increasing the cost and size of the system. A prototype featuring 300V input, 15V output, 400kHz switching frequency, and 150W output power.

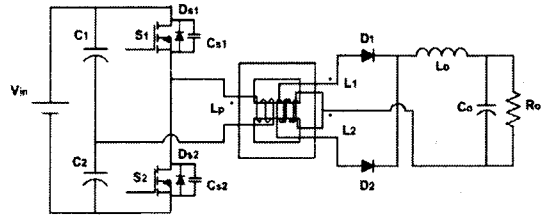


그림 1. 기존의 하프브리지 컨버터 회로

1. 서 론

스위치 모드 파워 서플라이(Switch Mode Power Supply)의 시스템에서 변압기와 인덕터는 에너지의 저장 및 전달과 전기적 절연, 필터의 역할 등에 사용되는 중요한 소자이다. 특히 최근의 연구에서는 고속 스위칭 방식을 적용하여 자성체 소자인 인덕터, 변압기의 크기와 무게를 줄여 전체 시스템의 소형·경량화를 추구하고 있다[1]. 따라서 본 논문에서는 다수의 자성체 소자를 결합한 방식을 도입함으로써 전체 시스템의 소자의 수를 줄이고 출력 전압·전류 리플을 감소시키는 장점을 가진 IM(Integrated Magnetics)방식을 적용한 ZVS 하프브리지 컨버터를 제안 하려 한다.

일반적인 하프브리지 컨버터는 주 스위치의 하드 스위칭 동작으로 인하여 손실이 큰 문제점을 지니고 있으나 제안된 컨버터에서는 주 스위치의 ZVS(Zero-Voltage-Switching)동작을 가능하게 함으로써 고주파 동작 및 효율 향상을 이룰 수 있었다. 또한 IM(Integrated Magnetics) 방식을 적용함으로써 출력 인덕터를 제거함으로써 전체 시스템의 크기를 줄이고, 출력전압·전류 리플을 저감시킬 수 있었다[1-2]. 본 연구에서는 제안된 컨버터의 동작 원리, 해석 및 특성에 대하여 논하였고 MOSFET를 사용하여 150W급 시스템을 제작했으며 400kHz에서 실험하였다.

2. 본 론

2.1 기존의 하프브리지 컨버터

기존의 컨버터는 상하의 스위치가 교대로 온·오프하여 1차측 에너지를 2차측으로 전달하는데, 2개의 스위치가 모두 오프일 때 변압기의 누설 인덕턴스(L_{lk})에 저장된 에너지가 소모될 경로가 없으므로, 스위치의 접합 커패시턴스와 공진을 일으키게 되어, 스위칭 소자의 전압 스트레스가 증가되는 결점을 지니고 있다.

2.2 제안된 컨버터

그림 2는 제안된 ZVS 비대칭 하프브리지 컨버터를 나타낸다.

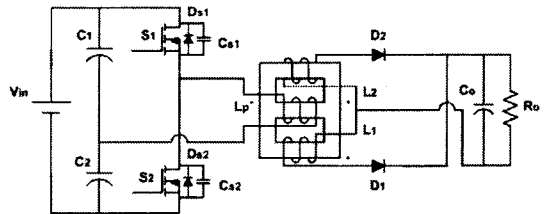


그림 2. 제안된 ZVS 하프브리지 컨버터 회로

제안된 회로에서는 변압기 1차측은 기존의 방식과 동일하게 결선했으나 누설인덕턴스의 크기를 조절하여 주 스위치의 ZVS(Zero-Voltage-Switching) 동작을 가능하게 했다. 또한 변압기 2차측에는 기존의 센터-탭 결선에 비교하여 출력 인덕터를 제거한 형태의 IM(Integrated Magnetics)방식을 적용, 자성체 소자의 수를 줄였으며 동시에 변압기의 전압·전류 리플의 저감을 가능하게 하였다[3-5].

2.3 이론적 파형 및 동작특성

그림 3, 4는 제안된 IM(Integrated Magnetics)방식을 적용한 ZVS 하프브리지 컨버터의 모드별 등가 회로 및 이론적인 각 부 파형을 나타내며, 모드별 정상상태 해석을 위해 다음과 같이 가정한다.

- 1) 모든 소자는 이상적이다.
- 2) 스위치 양단의 전압 리플은 무시한다.
- 3) 변압기 2차측의 누설 인덕턴스는 무시한다.
- 4) 출력커패시터(C₀)는 충분히 커서 스위칭 기간 동안 출력 전압은 일정하다.

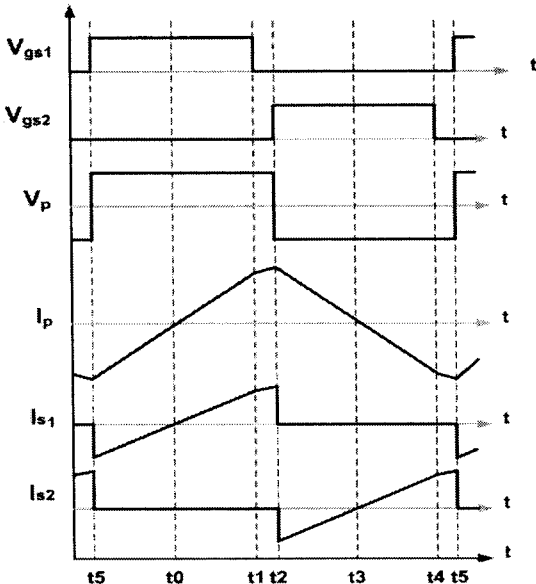
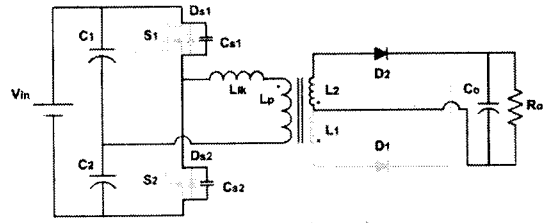
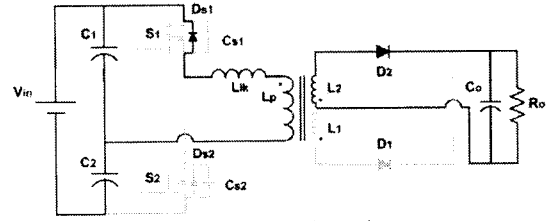


그림 3. 이론적인 회로 각부 파형



MODE 5 ($t_4 \sim t_5$)



MODE 6 ($t_5 \sim t_0$)

그림 4. 제안된 회로의 모드별 동작

1) 모드 1 : $t_0 \sim t_1$
 스위치 S_1 이 턴온되어, 정류 다이오드 D_1 을 통하여 입력 전력이 출력측으로 전달되는 구간이다. 이 구간에서 스위치 전류의 기울기는 단지 누설 인덕터 L_{lk} 에 의해 제한되며, 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$I_{S1} = \frac{V_{in}}{L_{lk}} t \quad (1)$$

2) 모드 2 : $t_1 \leq t \leq t_2$
 스위치 S_1 이 턴오프되면 1차측으로 흐르는 전류는 스위치 커패시터 C_{S1} 을 충전시키고 동시에 누설 인덕터에 저장된 에너지에 의하여 변압기 전류는 지속적인 흐름을 유지하려하고 스위치 커패시터 C_{S2} 를 방전시킨다. 스위치 S_1 의 전압·전류는 식(2),(3)으로 나타낼 수 있다.

$$V_{S1} = V_{in}(1 - \cos(\omega_1 t)) \quad (2)$$

$$I_{S1} = I_2 - V_{in} \sqrt{\frac{C_{S1}}{L_{lk}}} \sin(\omega_1 t) \quad (3)$$

$$\text{여기서, } \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_{lk} C_{S1}}}$$

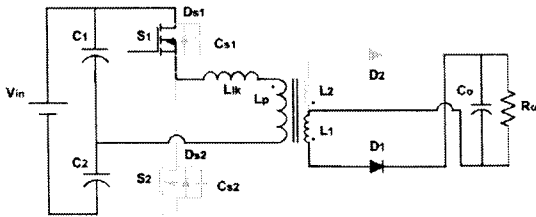
3) 모드 3 : $t_2 \leq t \leq t_3$
 누설 인덕터 L_{lk} 에 저장된 에너지가 스위치 S_2 의 역병렬 다이오드 D_{S2} 를 도통시키므로 영전압 스위칭(ZVS) 조건을 만족시키게 된다.

4) 모드 4 : $t_3 \leq t \leq t_4$
 스위치 S_2 가 영전압 스위칭(ZVS) 조건에서 턴온하며, 스위치 전류의 기울기는 누설 인덕터 L_{lk} 에 의해 제한되며 증가하게 된다.

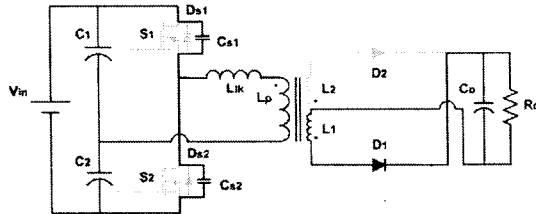
이때 스위치 커패시터 전류는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{S2} = \frac{V_{in}}{L_{lk}} t \quad (4)$$

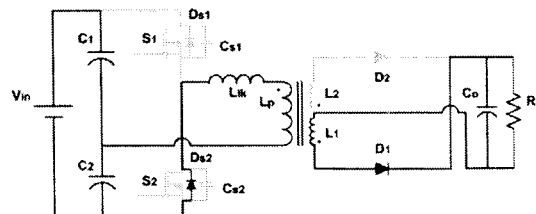
5) 모드 5 : $t_4 \leq t \leq t_5$
 스위치 S_2 가 턴오프 하게 되면 1차측으로 흐르는 전류는 스위치 커패시터 C_{S2} 를 충전시키고 동시에 누설 인덕터의 저장된 에너지에 의하여 스위치 커패시터 C_{S1} 을 방전하게 된다.



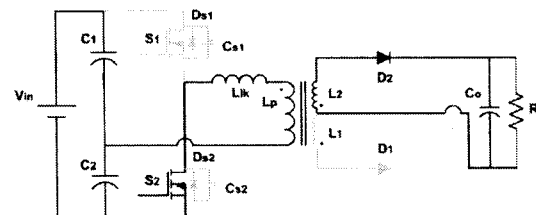
MODE 1 ($t_0 \sim t_1$)



MODE 2 ($t_1 \sim t_2$)



MODE 3 ($t_2 \sim t_3$)



MODE 4 ($t_3 \sim t_4$)

6) 모드 6 : $t_5 \leq t \leq t_6$

스위치 커패시터 C_{S1} 이 완전 방전하면 스위치 S_1 의 역병렬 다이오드 D_{S1} 이 도통하므로 스위치 S_1 의 영전압 스위칭(ZVS) 조건을 만족하게 되며 동시에 입력 전력이 정류 다이오드 D_2 를 통하여 출력측으로 전달되는 구간이다[6].

2.4 제안된 IM(Integrated Magnetics)의 설계

그림 5는 제안된 컨버터에 사용된 IM(Integrated Magnetics)의 실제 구조를 나타낸다.

IM(Integrated Magnetics)방식을 적용함으로써 기존의 변압기와 출력 인덕터가 분리된 방식에 비하여 전체 시스템의 크기를 줄일 수 있었다.

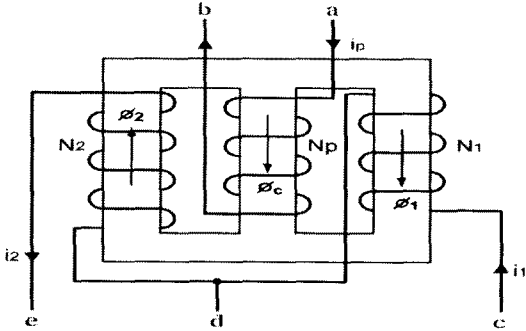


그림 5. IM(Integrated Magnetics)의 실제 모습

그림 6은 IM(Integrated Magnetics)의 등가 릴럭턴스 모델을 나타낸다.

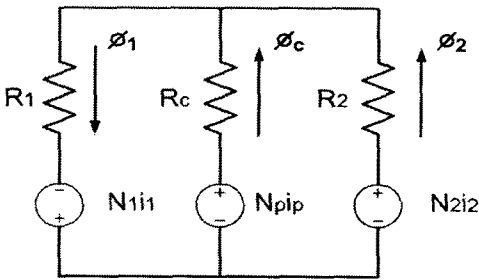


그림 6. IM(Integrated Magnetics)의 릴럭턴스 모델

다음을 가정하고 릴럭턴스 모델을 해석한다.

- 1) 공기 중의 누설 자속은 무시한다.
- 2) 입력전원에 의해서 1차측은 여자 된다.
- 3) 2차측 결선은 개방(Open)상태이다. ($i_1 = i_2 = 0$)

변압기의 중앙코어에 발생하는 자속은 다음과 같다.

$$\phi_c = \frac{N_p i_p}{R_c + R_1 // R_2} \quad (5)$$

여기서, ϕ_c : 중앙코어에 흐르는 자속

N_p : 중앙코어에 결선된 1차측 턴수

i_p : 중앙코어에 흐르는 전류

R_p, R_1, R_2 : 중앙코어의 양 측면코어의 릴럭턴스

따라서 단자 ab 의 결선에 따른 등가 인덕턴스는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{ab} = \frac{N_p \frac{d\phi_c}{dt}}{\frac{di_p}{dt}} \quad (6)$$

여기서, 식(6)에 (5)를 대입하면 식(7)과 같다.

$$L_{ab} = \frac{N_p^2}{R_c + R_1 // R_2} \quad (7)$$

자화 인덕턴스(L_m)와 중앙코어를 제외한 측면 코어 각각의 인덕턴스(L_1, L_2)를 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} L_m &= \frac{N_p^2}{R_c} \\ L_1 &= \frac{N_1^2}{R_1} \\ L_2 &= \frac{N_2^2}{R_2} \end{aligned} \quad (8)$$

따라서 L_{ab} 를 다시 정리하면 식(9)와 같다.

$$L_{ab} = L_m // \left[\left(\frac{N_p}{N_1} \right)^2 L_1 + \left(\frac{N_p}{N_2} \right)^2 L_2 \right] \quad (9)$$

여기서, N_1 과 N_2 는 각각 단자 cd 와 단자 de 사이의 턴수이다. 따라서 L_{ab} 와 같은 방법으로 L_{cd} 와 L_{de} 를 식(10),(11)로 정리할 수 있다.

$$L_{cd} = L_1 // \left[\left(\frac{N_1}{N_p} \right)^2 L_m + \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 L_2 \right] \quad (10)$$

$$L_{de} = L_2 // \left[\left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 L_1 + \left(\frac{N_2}{N_p} \right)^2 L_m \right] \quad (11)$$

식(9)~(11)과 같이 정의된 방정식을 등가 회로로 나타내면 그림 7과 같이 나타낼 수 있다.

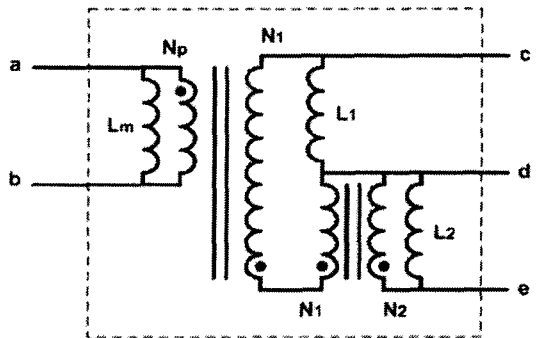


그림 7. IM(Integrated Magnetics)의 등가 회로

그림 7은 IM(Integrated Magnetics)의 등가 회로를 나타낸 것으로 세 개의 인덕터와 두 개의 변압기로 구성되어 있는 것을 알 수 있다. 변압기의 2차측 결선을 코어의 중앙에 하지 않고 코어의 양 측면에 했음을 알 수 있다.

2.5 실험 결과

제안된 방식은 400kHz, 150W의 시작품을 제작하여 실험하였다. 표 1은 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터 값을 나타낸다.

표 1. 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터

입력 전압(V_{in})	DC 300 V
출력 전압(V_o)	DC 15 V
주 변압기	EI70. TDK 12 : 6. $L_{lk} = 12.26 \mu\text{H}$
주 스위치(S)	IXFR 26N60Q. IXYS
2차측 정류 다이오드(D_o)	DSSK 60-0045B. IXYS
출력단 커패시터(C_o)	800 μF
스위칭 주파수(f)	400 kHz

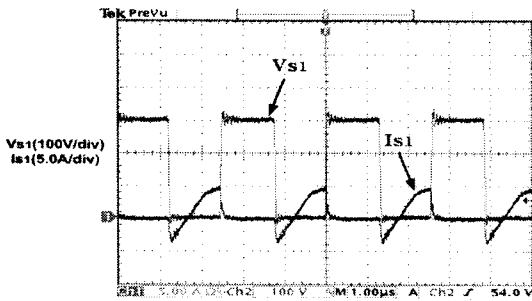


그림 8. 스위치 S_1 의 영전압 스위칭(ZVS) 파형

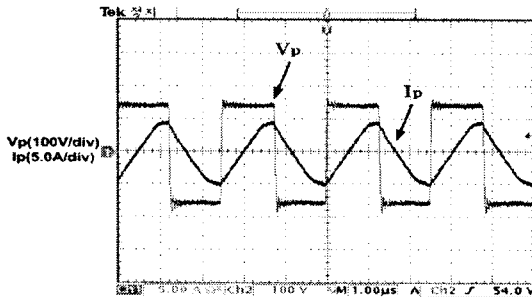


그림 9. 제안된 회로의 변압기 1차측 전압(V_p) 전류(I_p) 파형

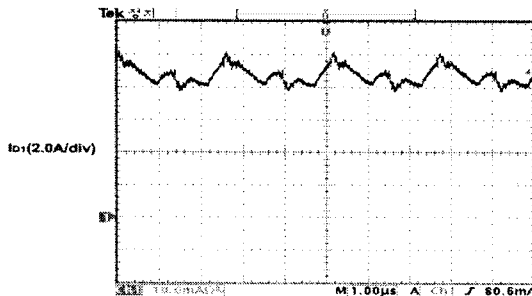


그림 10. 제안된 회로의 출력 정류기의 전류 파형

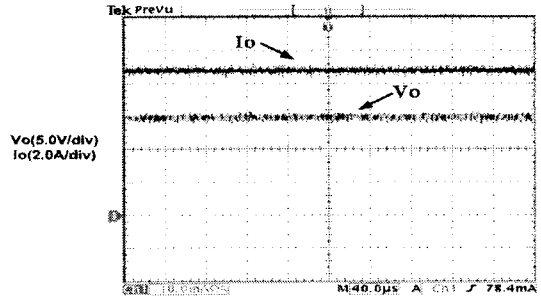


그림 11. 제안된 회로의 출력 전압(V_o) 전류(I_o) 파형

그림 8은 스위치 S_1 의 영전압 스위칭(ZVS)파형으로 턴온시 스위칭 손실이 저감됨을 알 수 있고 동시에 턴오프시 누설 인덕터(L_{lk})와 스위치 기생 커패시터(C_{s1}) 사이에 약간의 공진 현상이 있음을 보인다. 또한 스위칭 주파수가 400[kHz]임을 알 수 있다. 그림 9는 제안된 회로의 변압기 1차측의 전압·전류 파형을 나타낸다. 그림 10 출력단 정류기의 전류 파형으로 리플이 저감됨을 알 수 있다. 그림 11은 출력 전압(V_o)·전류(I_o)파형으로 전압이 15V임을 알 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 IM(Integrated Magnetics)방식을 적용한 ZVS 하프브리지 컨버터를 제안하였다. 제안된 컨버터는 기존의 하프브리지 컨버터에 비하여 영전압 스위칭(ZVS), 출력인덕터의 제거에 의한 변압기 2차단 결선의 간소화, 출력 전압·전류 리플의 저감 및 전체 시스템의 자성체 소자의 수 감소 등 많은 장점을 지니고 있음을 확인 할 수 있었다. 향후 효율특성 개선을 통하여 저전압 대전류 시스템의 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

[참고문헌]

- [1] Cheng, D.K.-W, Leung-Pong Wong, Yim-Shu Lee, "Design, modeling, and analysis of integrated magnetics for power converters," Power Electronics Specialists Conference, 2000. PESC 00. 2000 IEEE 31st Annual, vol.1, pp.320~325, June 18-23, 2000.
- [2] Peng Xu, Qiaoqiao Wu, Pit-Leong Wong, Lee, F.C, "A novel integrated current doubler rectifier," Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2000. APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE, vol.2, pp.735~740, Feb 6-10, 2000.
- [3] Chen W, Hua G, Sable D and Lee F, "Design of high efficiency, low profile, low voltage converter with integrated magnetics," Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1997. APEC '97 Conference Proceedings 1997., Twelfth Annual, Vol 2, pp.911-917, Feb 23~27, 1997.
- [4] Jian Sun, Webb, K.F, Mehrotra, V, "Integrated magnetics for current-doubler rectifiers," Power Electronics, IEEE Transactions on Vol.19, Issue 3, pp.582~590, May, 2004.
- [5] Jian Sun and Rajasekaran, V, "DCM analysis and Modeling of Half-Bridge Converters with Current-Doubler Rectifier" Power Electronics Specialists Conference, PESC. 2001 IEEE 32nd Annual, vol 1, pp. 384~389, June. 2001.
- [6] 배진용, 김 용, 이동현, 이은영, 최근수, "Three-Level 컨버터의 2차단 정류 방식에 따른 특성비교에 관한 연구," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1176~1180, KIEE 2004 하계학술대회, 2004.
- [7] 이대혁, 김 용, 배진용, 권순도, 이규훈, 조규만, "Current-Doubler 정류방식을 적용한 ZVS 비대칭 하프브리지 컨버터에 관한 연구," 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 169~172, KIEE 2004 추계학술대회, 2004.