

새로운 영전압 스위칭 2-트랜스포머 승압형 컨버터

박기범, 김정은, 문건우, 윤명중
한국과학기술원

A New Zero-Voltage-Switching Two-Transformer Boost Converter

Ki-Bum Park, Chong-Eun Kim, Gun-Woo Moon, Myung-Joong Youn
KAIST

ABSTRACT

A new zero voltage switching (ZVS) 2-transformer boost converter is proposed in this paper. The proposed converter has the advantage that the magnetizing inductor of the transformer acts for the boost inductor without additional inductor. Moreover, ZVS of main switches and auxiliary switches can be achieved, and the switch turn-off surge problem of conventional isolated boost converter is effectively solved. The operational principle, DC voltage gain, and ZVS characteristics are analyzed. To confirm the validity of the proposed converter, simulation results with 200W, 24Vdc/200Vdc specification are presented.

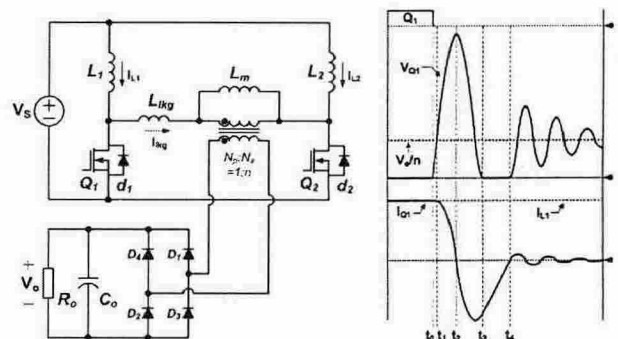
1. 서 론

승압 전력 변환 기술은 전기 자동차, 무정전 전원 장치(UPS), 서보 시스템 및 태양광 발전 등의 분야에 널리 쓰이고 있으며 그 수요와 요구되는 전력 사양이 계속 증가하고 있다. 기존의 강압형 타입의 절연형 컨버터를 승압 전력 변환에 사용할 경우, 변압기 턴비의 과도한 증가로 인하여 변압기 설계가 용이하지 못하며, 턴비의 증가에 따른 누설 인덕턴스의 증가는 고전압의 2차측 다이오드의 전압 진동을 더욱 심각하게 만들게 된다. 반면, 기존의 승압형 타입의 절연형 컨버터는 변압기의 설계가 용이하며, 고전압의 2차측 다이오드의 전압을 출력 전압으로 제한시켜주는 등의 장점을 가지고 있다. 절연형 승압 컨버터 중에서 그림 1에 나타난 2-인덕터 컨버터는 성능과 소자의 스트레스 측면에서 뛰어나 널리 사용되어지고 있지만 기존의 다른 절연형 승압 컨버터와 같이 다음과 같은 문제점들을 가지고 있다.

- 1) 스위치 턴-오프 시, 변압기 누설 인덕턴스에 의한 과도한 스위치 전압 켜지
- 2) 0.5 이상의 시비율 동작에 따른 초기 기동 시의 과도한 입력 전류 증가

3) 하드 스위칭으로 인한 스위칭 손실

본 논문에서는 위에서 언급된 기존의 절연형 승압 컨버터가 가지고 있는 문제점들을 해결하기 위한 새로운 절연형 2-인덕터 승압 컨버터를 제안한다.



(a) 회로도 (b) 스위치 전압 켜지
그림 1 기존의 절연형 2-인덕터 승압 컨버터

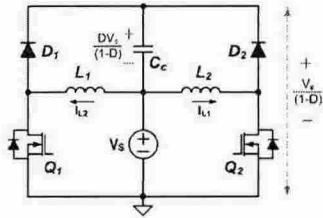
2. 본 론

2.1 제안된 컨버터의 구성 및 특성

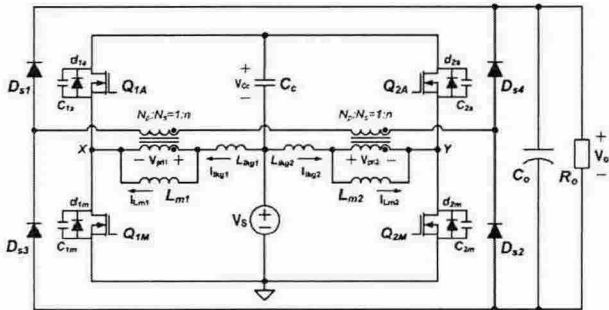
제안된 컨버터의 구성 및 동작 원리는 다음과 같다. 먼저, 그림 2(a)와 같이 병렬 구성된 비절연형 2-인덕터 승압 컨버터를 통하여 승압된 전압을 형성한다. 이후 절연 과정에서 그림 2(b)와 같이 2개의 승압 인덕터를 변압기의 자화 인덕터로 대체하며, 승압된 전압을 2차측으로 전달하기 위하여 D_1 , D_2 를 스위치로 대체하였다. 즉, 주 스위치 Q_{1M} , Q_{2M} 이 시비율 D 의 반주기의 위상차로 동작하며 승압 전압을 형성하고, 그림 3과 같이 대각선상의 스위치가 동시에 도통되면 승압된 전압을 누설 인덕터의 직렬 공진을 통하여 2차측으로 전달하게 된다.

제안된 컨버터는 승압 인덕터를 자화 인덕터로 대체함으로써 자기 소자의 수가 줄며, 1차측에서 승압 전압을 형성한 이후 2차측으로 전달하는 방식으로 스위치 전압 켜지 문제를 해결한다. 또한 승압 동작을 하는 주 스위치 Q_{1M} , Q_{2M} 이 시비율 0.5이하로 동작이 가능하므로 초기 기동 시 돌입전류를 억제할 수 있으며, 주 스위치와

보조 스위치가 풀 브릿지 형태로 구성되므로 영전압 스위칭을 통하여 스위칭 손실을 감소시킬 수 있다.



(a) 절연 전, 2-인덕터 승압형 컨버터



(b) 절연 후, 2-변압기 승압형 컨버터
그림 2 제안된 절연형 승압 컨버터

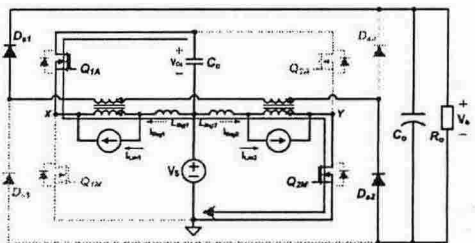


그림 3 변압기 2차측으로의 전력 전달 경로

2.2 제안된 컨버터의 동작 모드 해석

제안된 컨버터는 그림 4와 같이 주 스위치와 보조 스위치가 비대칭으로 동작하며 각각의 레그(leg)는 반주기의 위상차를 가진다. 모드 별 동작은 다음과 같으며, 모드 해석 시 I_{Lm1} 과 I_{Lm2} 는 정전류원으로 가정한다.

t_0 이전에는 Q_{1M} 과 Q_{2M} 을 통하여 I_{Lm1} 과 I_{Lm2} 가 흐르면서 부스팅 동작을 한다.

• Mode 1 ($t_0 \sim t_1$): t_0 에서 Q_{1M} 이 턴-오프 되면 인덕터 전류 I_{Lm1} 에 의해서 C_{1m} 이 충전되며, C_{1a} 가 방전된다.

$$t_{01} = \frac{(C_{1a} + C_{1m})(V_s + V_{Cc})}{I_{Lm1}(t_0)} \quad (1)$$

• Mode 2 ($t_1 \sim t_2$): t_1 에서 2차측 다이오드의 도통과 함께 V_{Q1} 가 0V가 되면 누설 인덕터에 의한 2차측으로의 직렬 공진 전력 전달 경로가 형성되어 $V_s + V_{Cc}$ 의 전압을 2차측으로 전달한다.

$$I_{ikg1}(t) = I_{ikg1}(t_1) \cdot \frac{V_s + V_{Cc} - V_o/n}{L_{ikg1} + L_{ikg2}} (t - t_1) \quad (2)$$

$$I_{ikg2}(t) = I_{ikg2}(t_1) + \frac{V_s + V_{Cc} - V_o/n}{L_{ikg1} + L_{ikg2}} (t - t_1) \quad (3)$$

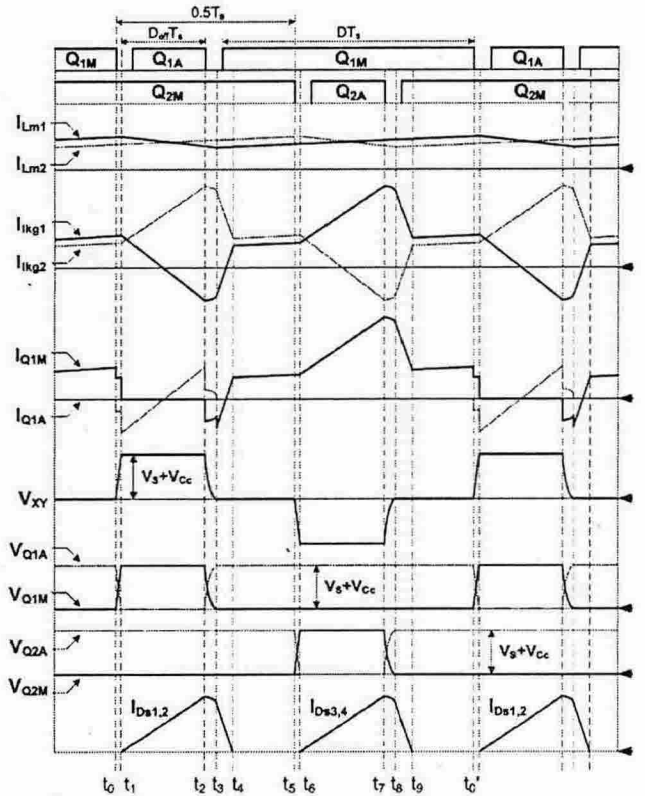


그림 4 제안된 컨버터의 주요동작파형

• Mode 3 ($t_2 \sim t_3$): t_2 에서 Q_{1A} 가 턴-오프 되면, $D_{S1,2}$ 가 도통되어 있으므로 변압기 1차측의 전압은 고정되어 $L_{ikg1} + L_{ikg2}$ 와 C_{1m} , C_{1a} 간의 공진에 의해 C_{1a} 는 충전되며, C_{1m} 이 방전된다.

$$I_{ikg1}(t) = I_{ikg1}(t_2) \cos(\omega_0(t - t_2)) \quad (4)$$

$$V_{Q1A}(t) = I_{ikg1}(t_2) \sqrt{\frac{L_{ikg1} + L_{ikg2}}{C_{1a} + C_{1m}}} \sin(\omega_0(t - t_2)) \quad (5)$$

$$V_{Q1M}(t) = V_s + V_{Cc} - I_{ikg1}(t_2) \sqrt{\frac{L_{ikg1} + L_{ikg2}}{C_{1a} + C_{1m}}} \sin(\omega_0(t - t_2)) \quad (6)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{(L_{ikg1} + L_{ikg2})(C_{1a} + C_{1m})}} \quad (7)$$

• Mode 4 ($t_3 \sim t_4$): t_3 에서 V_{Q1M} 이 0V가 되면 $L_{ikg1} + L_{ikg2}$ 에는 $-V_o/n$ 의 전압이 걸려 $I_{Ds1,2}$ 는 선형적으로 감소한다.

$$I_{ikg1}(t) = I_{ikg1}(t_3) + \frac{V_o/n}{L_{ikg1} + L_{ikg2}} (t - t_3) \quad (8)$$

$$I_{ikg2}(t) = I_{ikg2}(t_3) - \frac{V_o/n}{L_{ikg1} + L_{ikg2}} (t - t_3) \quad (9)$$

• Mode 5 ($t_4 \sim t_5$): t_4 에서 $I_{Ds1,2}$ 가 0이 되어 $D_{S1,2}$ 가 턴-오프 되고, I_{Lm1} , I_{Lm2} 가 Q_{1M} , Q_{2M} 을 통해 흐른다.

$t_5 \sim t_0'$ 의 동작은 Mode 1~Mode 5의 동작과 대칭이다.

2.3 입출력 관계식

L_m 의 전압*시간 균형 조건을 이용하면 V_{Cc} 는

$$V_{Cc} = \frac{D}{1-D} V_s \quad (10)$$

이며, 1차측으로부터 전달된 $I_{Ds1} + I_{Ds3}$ 의 한주기 동안의 평균값이 출력전류이므로,

$$\text{average}(I_{D1}+I_{D2})=I_o=\frac{V_o}{R_o}=\frac{1}{N} \frac{(1-D)^2 T_s}{L_{lk1}+L_{lk2}} \left\{ \frac{N(V_s+V_{cc})}{V_o} - 1 \right\} (V_s+V_{cc}) \quad (11)$$

제안된 컨버터의 입출력 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{2N}{(1-D) \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{4NQ}{K^2}} \right\}} = \frac{N}{1-D}, \quad K = \begin{cases} D & (D < 0.5) \\ 1-D & (D > 0.5) \end{cases} \quad (12)$$

$$Q = \frac{L_{lk1} + L_{lk2}}{R_o T_s} \quad (13)$$

누설 인덕터에 의한 직렬 공진 전력 전달 현상의 Q가 작으면, 제안된 컨버터의 입출력 관계식은 $N/(1-D)$ 로 근사되며 기존의 승압 컨버터와 동일함을 알 수 있다.

2.4 영전압 스위칭 조건

보조 스위치 Q_{1A} , Q_{2A} 의 영전압 스위칭은 자화 인덕터 전류의 에너지에 의해서 이루어지므로 다음과 같이 뛰어난 영전압 스위칭 조건을 가지며,

$$\frac{1}{2}(C_{1a}+C_{1m})(V_s+V_{cc})^2 \leq \frac{1}{2}L_m I_{Lm1}(t_0)^2 \quad (14)$$

주 스위치 Q_{1M} , Q_{2M} 의 영전압 스위칭은 누설 인덕터와 스위치 출력 캐패시터 간의 공진에 의해 이루어진다.

$$\frac{1}{2}(C_{1a}+C_{1m})(V_s+V_{cc})^2 \leq \frac{1}{2}(L_{lk1}+L_{lk2})I_{lk1}(t_2)^2 \quad (15)$$

$$I_{Lm1}(t_0) = I_{lk1}(t_2) = \frac{I_m}{2} \quad (16)$$

3. 모의 실험

제안된 컨버터의 동작을 검증하기 위하여 200W, $V_s=24V_{dc}$, $V_o=200V_{dc}$, $N_p:N_s=1:2.5$, $L_{m1}=L_{m2}=600\mu H$, $L_{lk1}=L_{lk2}=2.5\mu H$, $C_{1M}=C_{1A}=500pF$, $f_s=100kHz$ 사양으로 모의실험을 하였다.

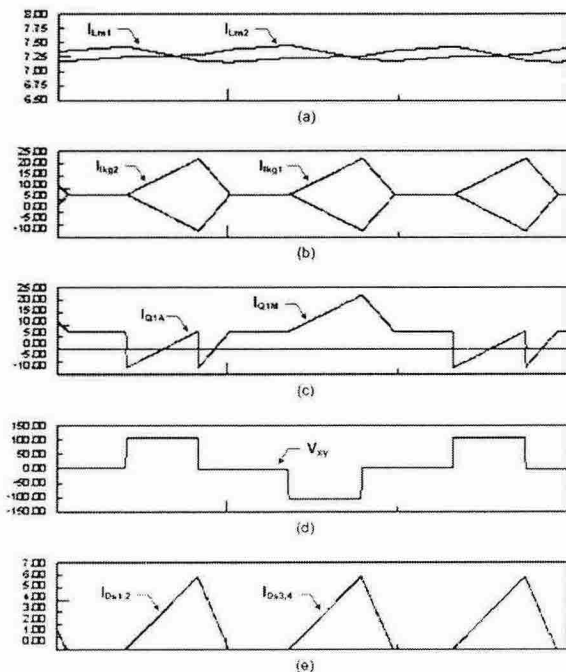


그림 5 모의실험 주요동작파형

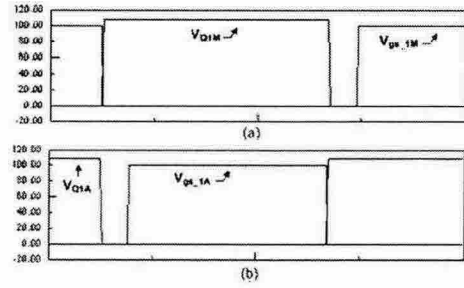


그림 6 모의실험 영전압 스위칭 파형

그림 5는 주요동작파형을 나타내며, 그림 6에서 영전압 스위칭 동작과 주 스위치와 보조 스위치의 전압이 V_s+V_{cc} 로 제한됨을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 기존의 절연형 승압 컨버터가 가지는 문제점들을 해결하기 위하여 새로운 절연형 2-변압기 승압 컨버터를 제안하였다. 제안된 컨버터는 기존 2-인덕터 승압 컨버터의 2개의 승압 인덕터를 변압기의 자화 인덕터로 대체함으로써 자기 소자의 수가 줄며, 스위치 전압이 V_s+V_{cc} 로 제한되어 턴-오프 전압 썬지 문제를 해결한다. 또한 승압 동작을 하는 주 스위치가 시비율 0.5 이하 동작이 가능하므로 초기 기동 시의 돌입 전류를 억제할 수 있으며, 주 스위치와 보조 스위치의 영전압 스위칭 동작으로 스위칭손실을 크게 줄일 수 있다. 제안된 컨버터의 구성, 동작 원리, 입출력 관계식, 및 영전압 스위칭 조건을 분석하였으며, 모의실험을 통하여 제안된 컨버터의 동작을 검증하였다.

이 논문은 한국과학기술원 인간친화복지로봇센터 (HWRS-ERC)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] R. Redl and N. O. Sakal, "Push-Pull Current-fed Multiple Output DC/DC Converter with Only One Inductor and with 0 to 100% Switch Duty Ratio", IEEE Power Electronics Specialist Conference, 1980.
- [2] Peter J. Wolfs, "A Current-Sourced DC-DC Converter Derived via the Duality Principle from the Half-Bridge Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 40, no. 1, pp. 139-144, Feb. 1993.
- [3] V. J. Thottuvelli, T. G. Wilson and H. A. Owen Jr., "Analysis and Design of a Push-Pull Current-fed Converter", IEEE Power Electronics Specialist Conference 1981.
- [4] S. K. Han, H. K. Yoon, G. W. Moon, M. J. Youn and Y. H. Kim, "A New Active Clamping Non-dissipative Snubber for ZVS PWM Current-fed Half-bridge Converter", IEE Conference on EPE, 2003.