

자기구동 동기스위치를 이용한 비절연 고효율 고전압출력 DC-DC 컨버터

Non-Isolation, High-Efficiency and High-Voltage-Output DC-DC Converter using the Self-Driven Synchronous Switch

정 강 루^{*}

Gang-Youl Jeong^{*}

Abstract

In this paper, the non-isolation, high-efficiency and high-voltage-output DC-DC converter using the self-driven synchronous switch is proposed. The proposed converter achieves high-voltage-output by applying a tapped inductor to the conventional boost DC-DC converter structure, and it reduces the voltage stress of main switch applying the lossless capacitor-diode (LCD) snubber to the switch. And the proposed converter applies the synchronous switch instead of the diode to the output part, and thus it resolves the reverse recovery problem and achieves high-efficiency. The synchronous switch of proposed converter uses the self-driven method and has a simple structure. In this paper, the operation principle of proposed converter is explained, and then, a design example of the converter prototype is presented. And the characteristics of the proposed converter are shown through experimental results of the prototype made with the designed circuit parameters.

요 약

본 논문에서는 자기구동 동기스위치를 이용한 비절연 고효율 고전압출력 DC-DC 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터는 전통적인 승압형 DC-DC 컨버터 구조에 탭형 인덕터를 적용함으로써 고전압출력을 달성하며 주스위치부에 무손실 커패시터-다이오드(LCD, lossless capacitor-diode) 스너버를 적용하여 스위치 전압스트레스를 저감한다. 그리고 출력부에 다이오드 대신에 동기스위치를 적용함으로써 역회복 문제를 해결하고 고효율을 달성한다. 제안한 컨버터의 동기스위치는 자기구동방식을 이용하고 단순한 구조를 가진다. 본 논문에서는 제안한 컨버터의 동작원리를 먼저 설명하고, 후에 컨버터 프로토타입의 설계예를 제시한다. 그리고 설계된 회로파라미터로 제작된 프로토타입의 실험결과로써 제안한 컨버터의 특성을 보인다.

Key words : High-voltage-output, reduced switch voltage-stress, tapped inductor, lossless capacitor-diode (LCD) snubber, self-driven synchronous switch

* Dept. of Electronic Information Engineering, Soonchunhyang University

★ Corresponding author

E-mail : gangyoul@sch.ac.kr, Tel : +82-41-530-1337

※ Acknowledgment

This work was supported by the Soonchunhyang University Research Fund.

Manuscript received Sep. 5, 2019; revised Sep. 24, 2019; accepted Sep. 25, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

산업 현장의 각종 전기전자 장비들이 점점 더 고성능화되면서, 고전압출력의 DC-DC 컨버터들이 더욱 널리 이용되고 있다. 그런데 이러한 DC-DC 컨버터들은 주로 고주파 변압기의 사용 여부에 따라 절연형과 비절연형으로 구분된다. 절연형 DC-DC 컨버터는 변압기를 이용한 전기적 절연 및 최적 듀티비(duty ratio) 등의 장점이 있는 반면, 변압기의 누설인덕턴스로 인한 써지전압 및 전자과유도장해(EMI)의 발생, 그리고 낮은 컨버터 전체 효율과 큰 부피 및 높은 가격 등의 단점이 있다[1]-[2]. 능동 클램프 회로를 이용한 소프트스위칭 기법으로 절연형 DC-DC 컨버터의 단점을 극복하려는 노력이 있었지만, 이 기법에 의한 컨버터는 클램프 스위치의 전압스트레스가 높아지는 또 다른 문제점이 유발되었다[3]-[4]. 그러므로 전기적 절연이 필요 없는 응용에서는 변압기를 사용하지 않는 비절연형 승압형 DC-DC 컨버터를 이용하는 것이 합리적이다.

이러한 응용에서는 주로 전통적 방식의 승압형 DC-DC 컨버터들을 많이 이용한다. 하지만 이러한 컨버터들은 출력전압이 입력전압과 듀티비에 의해서만 정해지는 한계가 있다. 따라서 입력전압에 비해 상대적으로 매우 높은 출력전압이 필요한 응용에서는, 컨버터 스위치의 듀티비와 전압스트레스가 커지고 다이오드의 역회복 특성으로 인한 스위칭 손실도 커지기 때문에 컨버터의 고효율과 고전력 밀도 달성이 어려운 단점이 있다[5].

전통적 승압형 DC-DC 컨버터의 단점들을 극복하기 위하여 두 개의 인덕터 권선을 자기적으로 결합한 탭형 인덕터를 이용하여 고출력전압을 구현하는 새로운 형태의 승압형 DC-DC 컨버터가 제안되었다[6]-[8]. 하지만 이러한 방식의 DC-DC 컨버터들은 탭형 인덕터의 누설인덕턴스로 인한 높은 스위치 전압스트레스와 출력다이오드의 도통전류로 인한 다이오드 역회복 문제 등의 단점을 가진다[9].

본 논문에서는 자기구동 동기스위치를 이용한 비절연 고효율 고전압출력 DC-DC 컨버터를 제안하고자 한다. 제안하는 컨버터는 고전압 출력을 달성하기 위하여 전통적 방식의 승압형 DC-DC 컨버터 구조에 탭형 인덕터를 적용한다. 제안한 컨버터는 무손실 커패시터-다이오드(LCD, lossless capacitor-diode) 스너버를 이용하여 주스위치의 전압스트레

스를 저감하며 출력부에 단순한 방식의 자기구동 동기스위치를 적용하여 출력다이오드를 대체함으로써 다이오드의 역회복 문제를 해결하고 컨버터의 전체 효율을 향상시킨다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 먼저, 제안한 컨버터의 동작원리를 설명하고 후에 컨버터 프로토타입의 간단한 설계예를 제시한다. 그리고 설계예에서 선정된 각 회로파라미터에 의해 제작된 프로토타입의 실험결과로써 제안한 컨버터의 특성을 보이며 마지막으로 결론을 맺는다.

II. 제안한 컨버터의 동작

1. 동작원리

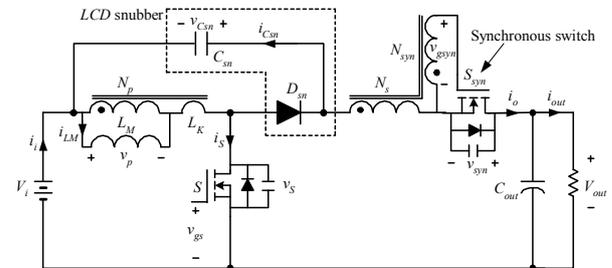


Fig. 1. The power circuit diagram of proposed DC-DC converter.

그림 1. 제안하는 DC-DC 컨버터의 전력회로도

그림 1은 제안하는 비절연 고효율 고전압출력 DC-DC 컨버터의 전력회로도이다. 제안한 컨버터의 탭형 인덕터는 1차 인덕터 권선 N_p 와 2차 인덕터 권선 N_s 로 구성되고 변압기와 유사하게 다음의 식과 같은 권선비 a 를 가진다.

$$a = \frac{N_p}{N_s} \quad (1)$$

또한 제안한 컨버터의 탭형 인덕터는 자기구동 동기스위치를 구동하기 위하여 구동권선 N_{syn} 을 포함한다. 탭형 인덕터의 L_M 과 L_K 는 각각 인덕터 1차측의 자화인덕턴스와 누설인덕턴스를 나타낸다. 그리고 LCD 스너버는 커패시터 C_{syn} 과 다이오드 D_{syn} 으로 구성된다. MOSFET S 는 컨버터의 주스위치로 PWM(pulse-width modulation, 펄스폭변조) 방식으로 동작하며, MOSFET S_{syn} 은 동기스위치이다. 해석의 용이함을 위해 출력커패시턴스 C_{out} 은 이상적으로 매우 크다고 가정한다.

제안한 DC-DC 컨버터의 전압이득식은 자화인덕턴스 L_M 에 전압-초 균형 법칙(volt-second balance rule)을 적용하여 다음과 같이 얻는다.

$$\frac{V_{out}}{V_i} = \frac{1+D/a}{1-D} \quad (2)$$

여기서 D 는 주스위치 S 의 듀티비이다. 식 (2)에서 보듯이, 제안한 컨버터는 탭형 인덕터의 권선비 a 에 의하여 전통적인 승압형 DC-DC 컨버터에 비해 높은 전압이득을 가진다.

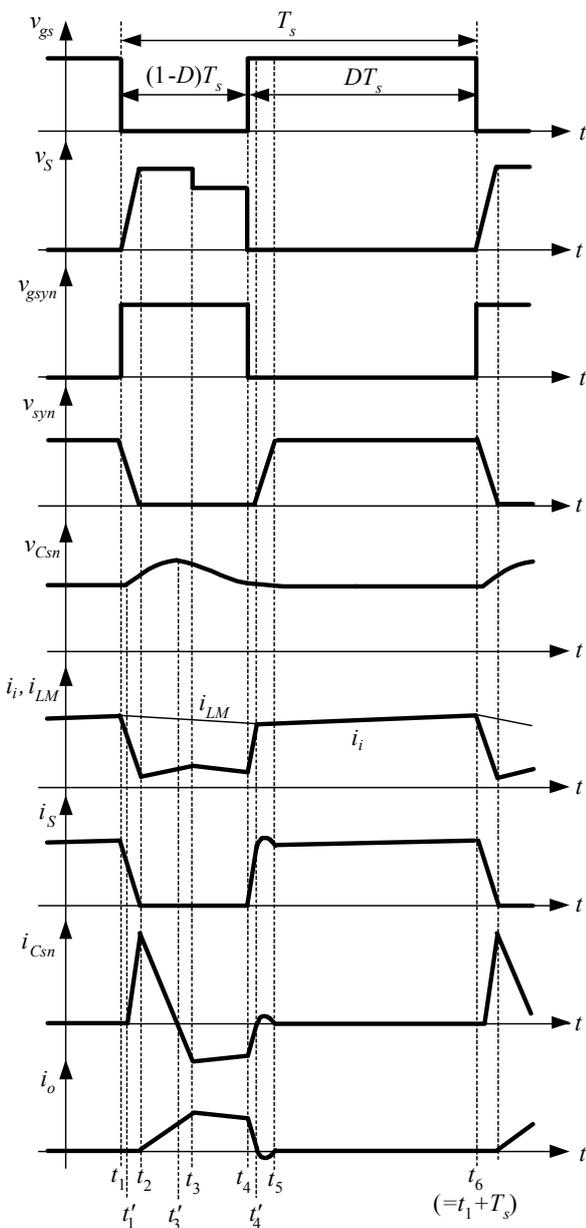
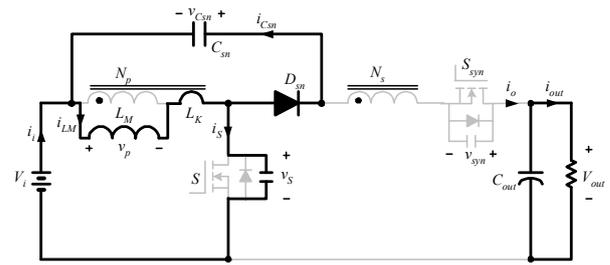
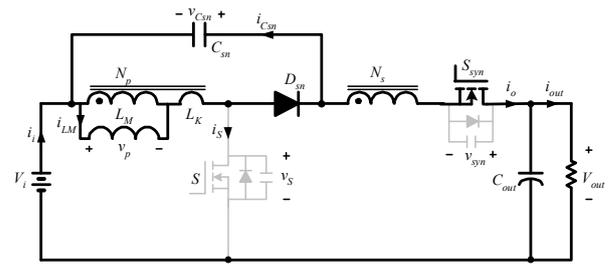


Fig. 2. The theoretical operation waveforms of proposed converter in steady state.

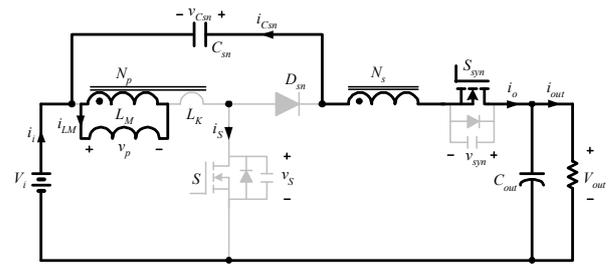
그림 2. 제안한 컨버터의 정상상태 이론적 동작파형



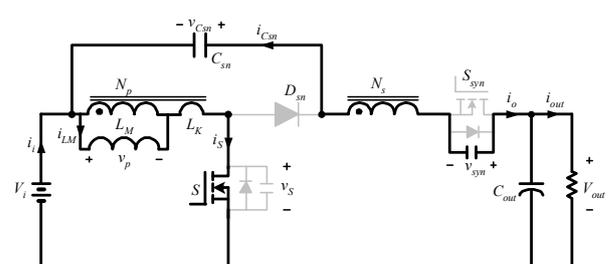
(a) Mode 1.
(a) 모드 1



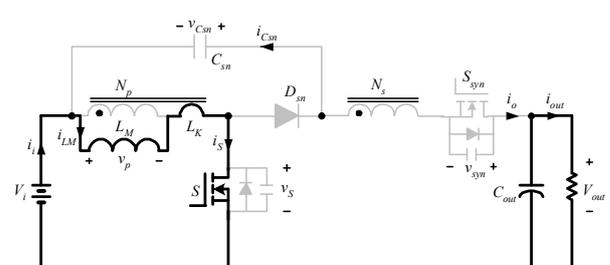
(b) Mode 2.
(b) 모드 2



(c) Mode 3.
(c) 모드 3



(d) Mode 4.
(d) 모드 4



(e) Mode 5.
(e) 모드 5

Fig. 3. The equivalent circuits of each operation mode of proposed converter in steady state.

그림 3. 제안한 컨버터의 정상상태 동작모드별 등가회로

제안한 컨버터의 동작은 각 회로요소의 전압, 전류의 상태에 따라 5개의 동작모드로 구분된다. 그림 2와 3은 제안한 컨버터 정상상태의 이론적 동작과 형과 동작모드별 등가회로를 각각 보인다. 그림 3에서 선의 짙고 옅음은 각각 전류의 도통과 미도통 부분을 나타내며, 설명의 편의상, 전력의 주된 흐름에 관계된 부분만 표시하기 위해 동기스위치 구동권선 N_{syn} 의 표시는 생략한다. 각 동작모드별 컨버터 회로의 동작을 간략히 설명하면 다음과 같다.

모드 1($t_1 \sim t_2$) : 시간 $t=t_1$ 에서 주스위치 S가 턴오프된다. 그러면 S의 출력커패시터 C_S 는 자화전류 i_M 에 의해 선형적으로 충전된다. 그러다가 C_S 의 전압(스위치 전압) v_S 가 직렬 전압 $V_i + v_{Csn}$ 과 같아지면($v_S = V_i + v_{Csn}$), 시간 $t=t_1$ 직후(t_1' 지점) LCD 스너버의 다이오드 D_{sn} 이 턴온되어 스너버 커패시터 C_{sn} 을 충전하고 시간 $t=t_2$ 에서 스위치 전압 v_S 는 다음과 같이 제한된다.

$$v_S(t_2) = V_i \left[1 + \frac{(1-k) + a(1+k)}{2a} \frac{D}{1-D} \right] \quad (3)$$

여기서 D 는 주스위치 S의 듀티비이고 k 는 탭형 인덕턴스의 결합계수로 다음 식과 같이 정의된다.

$$k = \frac{L_M}{L_M + L_K} \quad (4)$$

모드 2($t_2 \sim t_3$) : 시간 $t=t_2$ 에서 스위치 전압 v_S 가 충전되어 입력전압 V_i 와 같아지면, 주스위치 전류 i_S 는 0이 된다. 하지만 이 때 동기스위치 S_{syn} 이 턴온되어 자화인덕턴스 L_M 에 음(-) 전압이 인가되므로 자화전류 i_M 은 선형적으로 감소하면서 계속 흐른다. 그리고 LCD 스너버 다이오드 D_{sn} 은 계속 도통하고, 스너버 커패시터 C_{sn} 은 누설인덕턴스 L_K 와 공진하여 시간 $t=t_3$ 직전(t_3' 지점)에 충전된 에너지를 출력측으로 방전하기 시작한다. 그리고 이 때 자화인덕턴스 L_M 에 충전된 에너지가 탭형 인덕터 2차측으로 방전되기 시작한다. 스너버 커패시터 전압 v_{Csn} 과 출력전류 i_o 는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$v_{Csn} = \frac{(1-k) + a(1+k)}{2a} \frac{D}{1-D} V_i \quad (5)$$

$$i_o(t) = \left(1 + \frac{kD}{1-D} \right) \frac{aV_i}{L_K} (t-t_2) \quad (6)$$

모드 3($t_3 \sim t_4$) : 모드 2에서의 출력전류 i_o 가 식 (6)과 같이 선형적으로 증가하다가, 시간 $t=t_3$ 에서 방전하는 LCD 스너버 커패시터 C_{sn} 의 전류 $-i_{Csn}$ 과 같아진다($i_o = -i_{Csn}$). 그러면 스너버 다이오드 D_{sn} 의 전류 i_{Dsn} 이 0이 되어 D_{sn} 이 턴오프 된다. 이 때 동기스위치 S_{syn} 이 계속 도통되는 상태에서 출력전류 i_o 는 선형적으로 감소하며 C_{sn} 에 충전된 에너지를 출력측으로 방전된다.

모드 4($t_4 \sim t_5$) : 시간 $t=t_4$ 에서 주스위치 S의 게이트 단에 구동전압을 인가하면, S는 턴온되어 스위치 전류 i_S 를 다음과 같이 흘린다.

$$i_S(t) = \frac{a}{L_K} \left[\frac{1-a}{a} V_i + (V_{out} - v_{Csn}) \right] (t-t_4) \quad (7)$$

이 때, 동기스위치 S_{syn} 의 구동신호는 주스위치 S와 부논리($S_{syn} = \bar{S}$)이므로 턴오프된다. 한편 i_S 가 증가하면서 자화인덕턴스 전류 i_M 과 같아질 때까지 누설인덕턴스 L_K 는 빠르게 충전되고, LCD 스너버 커패시터 C_{sn} 의 전류 i_{Csn} 이 방전하며 감소하여 시간 $t=t_4$ 의 직후 (t_4' 지점)에 0이 된다. 그 직후, 시간 $t=t_4' \sim t_5$ 동안 S_{syn} 의 기생커패시터 C_{syn} 과 탭형 인덕터의 2차측으로 반영된 인덕턴스 L_M/a^2 및 C_{syn} 에 의한 공진전류 i_{Csn} 이 정현파적으로 작게 흐르다가 다시 0이 되면, 이 모드는 끝이 난다.

모드 5($t_5 \sim t_6$) : 모드 4에서 시작된 주스위치 S와 동기스위치 S_{syn} 의 도통상태와 차단상태가 각각 유지된다. 따라서 입력전류 i_i 는 자화인덕턴스 L_M 과 누설인덕턴스 L_K 를 입력전압 V_i 에 의해 충전하면서 다음과 같이 선형적으로 증가한다.

$$i_i(t) = i_{LM}(t_5) + \frac{V_i}{L_M + L_K} (t-t_5) \quad (8)$$

시간 $t=t_6$ 에서 주스위치 S가 턴오프되면, 이 모드가 끝남과 동시에 컨버터의 한 주기 동작도 끝이 난다. 그리고 다음 동작 주기가 다시 시작된다.

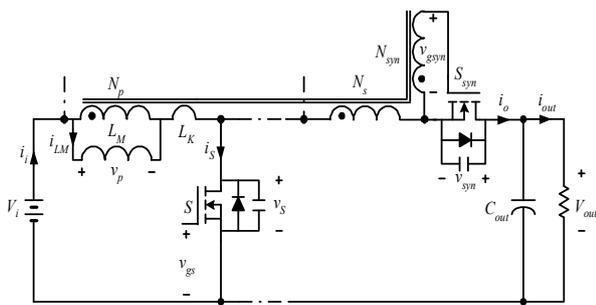
2. 동기스위치의 동작

그림 4는 제안한 컨버터의 동기스위치의 동작 개념을 간략하게 보인다. 그림 4(a)는 설명의 편의를 위해 동기스위치의 동작과 관련된 부분만을 표시한 회로도이고 그림 4(b)와 (c)는 동기스위치의 턴

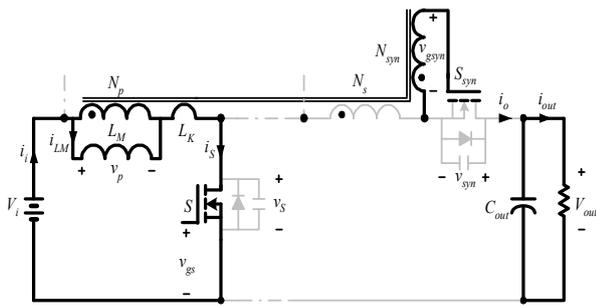
오프(DT_s 구간)와 턴온($(1-D)T_s$ 구간) 모드의 등가회로를 각각 보인다. 또한 그림 4(d)는 동기스위치 주요부의 이론적인 동작파형을 보인다. 탭형 인덕터의 각 권선 N_p, N_s, N_{syn} 은 단일 코어내에 함께 권선된다.

그림 4(b)와 같이, 주스위치 S 가 턴온 되면 입력 전원의 에너지가 자화인덕턴스 L_M 에 충전되면서 탭형 인덕터의 1차측 전압 v_p 는 양(+의) 입력전압 V_i 가 된다($v_p=V_i>0$). 그러면 구동권선의 전압 v_{gsyn} 은 다음과 같이 음(-)으로 유기되어 직전 턴온 모드에서 충전되었던 턴온 게이트 전압을 방전하므로 동기스위치 S_{syn} 은 턴오프된다.

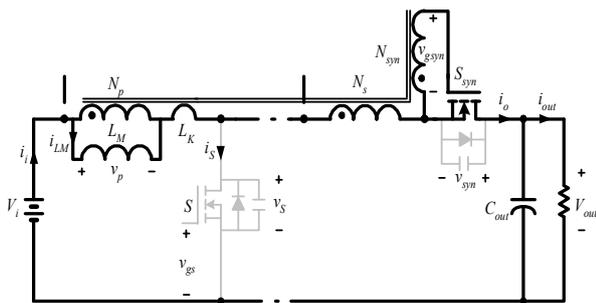
$$v_{gsyn} = \frac{N_{syn}}{N_p} V_i < 0 \tag{9}$$



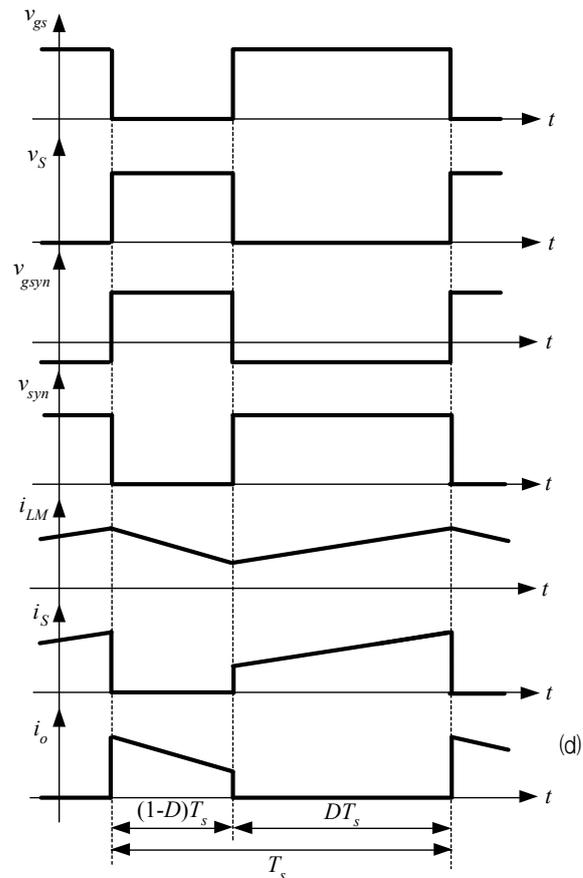
(a) Circuit diagram related to the synchronous switch drive.
(a) 동기스위치 구동 관련회로도



(b) Turn off mode of the synchronous switch.
(b) 동기스위치의 턴오프 모드



(c) Turn on mode of the synchronous switch.
(c) 동기스위치의 턴온 모드



(d) Theoretical operation waveforms of the synchronous switch.
(d) 동기스위치의 이론적 동작파형

Fig. 4. Simple concept of the synchronous switch.
그림 4. 동기스위치 동작의 간략한 개념

또한 그림 4(c)와 같이, 주스위치 S 가 턴오프 되면 동기스위치 S_{syn} 의 턴오프 모드 때 자화인덕턴스 L_M 에 충전된 에너지가 탭형 인덕터의 1차 권선 N_p 와 2차 권선 N_s 를 통하여 방전된다. 그러면 동기스위치의 구동전압 v_{gsyn} 은 양(+의) 전압이 됨과 동시에 다음 식 (10)과 같이 되어 동기스위치 S_{syn} 의 게이트단을 충전하므로, v_{gsyn} 이 MOSFET 턴온 문턱전압(threshold voltage) V_{th} 보다 크게 되고 S_{syn} 은 턴온된다.

$$v_{gsyn} = \frac{N_{syn}}{N_p} \frac{a(V_i - V_{out})}{1+a} > V_{th} \tag{10}$$

여기서 동기스위치 구동권선 N_{syn} 은 구동스위치의 게이트 전압 v_{gsyn} 이 V_{th} 보다 크게 되도록 하는 권선수로 탭형 인덕터 내에 포함하여 권선된다.

이러한 방식으로 구동되는 동기스위치를 자기구동 동기스위치(self-driven synchronous switch)라

고 한다. 이러한 방식은 별도의 구동전원이 필요없고 탭형 인덕터 내에 수 턴의 동기스위치 구동권선만 포함하면 되므로 그 구조가 매우 간단한 장점을 가진다.

III. 제안한 컨버터 프로토타입의 설계예

제안한 컨버터 프로토타입의 설계사양은 다음과 같다.

- 입력전압 $V_i = 24V$
- 출력전압 $V_{out} = 400V$
- 최대 출력전력 $P_{max} = 200W$
- 공칭 최대 듀티비 $D_{nom} = 3/4$
- 스위칭주파수 $f_s = 100kHz$

탭형 인덕터의 권선비 a 는 식 (2)를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$a = \frac{D}{\left(\frac{V_{out}}{V_i}(1-D)\right) - 1} = \frac{9}{38} \quad (11)$$

여기서 듀티비 D 는 컨버터가 최대 출력전력 P_{max} 로 동작하는 것을 가정하여 공칭 최대 듀티비 $D=D_{nom}$ 으로 두어 계산한다.

또한 탭형 인덕터의 자화인덕턴스 L_M 은 식 (8)을 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$L_M \approx L_M + L_k = V_i \frac{DT_s}{\Delta i_M} = 60\mu H \quad (12)$$

여기서 DT_s 는 주스위치의 턴온시간으로 모드 5의 시간과 거의 근사하므로 공칭 최대 듀티비를 고려하여 $DT_s = D_{nom}T_s = 7.5\mu sec$ 로 두고, 자화인덕턴스의 리플전류 Δi_M 은 프로토타입의 PCB에 실장되는 인덕터의 크기를 고려하여 $\Delta i_M = 3A$ 로 둔다. 탭형 인덕터의 1차 권선수 N_p 는 다음의 인덕턴스 식을 이용하여 계산한다.

$$L_M = \frac{N_p^2}{R_C} \quad (13)$$

여기서 L_M 은 식 (12)에서 계산된 자화인덕턴스 값을 대입하고 R_C 는 인덕터 코어의 릴럭턴스 값으로, 본 프로토타입에서 이용하는 인덕터 코어의 테

이터시트에 제시된 값을 대입한다[10]. 그리하여 $N_p = 14T$ 의 값을 얻는다. 식 (12)의 계산된 자화인덕턴스 L_M 값은 인덕터 코어에 적당한 에어갭(air-gap)을 삽입하여 구현한다. 그러면 누설인덕턴스가 필연적으로 생기는데, 이 때 생긴 누설인덕턴스는 $L_K = 3\mu H$ 였다. 또한 탭형 인덕터의 2차측 권선수는 권선비 a 에 관한 식 (1)을 이용하여 $N_s = 76T$ 로 정한다. 그리고 동기스위치의 구동권선수 N_{syn} 은 식 (10)에 의해 다음의 식을 이용하여 정한다.

$$N_{syn} = \frac{v_{gsyn} N_p (1+a)}{a(V_{out} - V_i)} \quad (14)$$

여기서 v_{gsyn} 은 MOSFET 스위치의 구동전압으로 설계여유(design margin)를 고려하여 턴온 문턱전압보다 다소 큰 값인 MOSFET의 권장 구동전압(약 15V)으로 둔다. 그리하여 $N_{syn} = 3T$ 로 선정한다. 인덕터의 각 권선은 리츠와이어를 이용한다.

한편, LCD 스너버의 공진요소들에 의한 공진주파수 f_{res} 는 컨버터 주스위치 S의 소프트스위칭을 위하여 다음의 관계를 만족하여야 한다.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_K C_{sn}}} > f_s \quad (15)$$

여기서 f_s 는 주스위치 S의 스위칭주파수이고, L_K 는 탭형 인덕터의 누설인덕턴스로 인덕터 제작 시 생긴 누설인덕턴스 값을 대입하고 C_{sn} 은 LCD 스너버의 커패시턴스로 식 (15)의 관계를 만족하도록 적당한 값을 대입한다. 그리하여 C_{sn} 은 $C_{sn} = 10nF$ 로 선정한다.

제안한 컨버터의 주스위치 MOSFET S를 선정하기 위하여 주스위치 전압 v_s 를 식 (3)에 의해 계산한다.

$$v_s = V_i + \frac{(1-k) + a(1+k)}{2a} \frac{DV_i}{1-D} \approx 77.5V \quad (16)$$

여기서 k 는 인덕턴스의 결합계수로 선정 및 측정된 L_M 과 L_K 의 값에 의해 식 (4)를 이용하여 계산된 값으로 $k = 60/63$ 을 대입하고 D 는 주스위치 S의 듀티비로 $D = D_{nom}$ 을 대입한다. 그리하여 S는 계산된 스위치 전압의 정격전압을 만족하는 ON Semiconductor사의 IRFB4615PBF(100V, 12.8A, 142mΩ)로 선정한다. 또한 LCD 스너버의 다이오드 D_{sn} 의 내압 역시 회로의

구조와 동작상, 주스위치의 내압과 동일하므로 D_{sn} 도 주스위치의 정격전압과 같은 사양으로 정한다. 하여 VISHAY사의 쇼트키 다이오드인 MBR10100(100V, 10A)으로 선정한다.

출력부의 동기스위치 MOSFET S_{syn} 은 다음의 식 (17)을 이용하여 동기스위치 전압 v_{syn} 을 계산하여 정한다.

$$v_{syn} = \frac{2(1+D(1-k))V_{out}}{D(1+k)(a+1)+2a(1-D)} \approx 430V \quad (17)$$

그리하여 S_{syn} 은 계산된 스위치 전압의 정격내압을 만족하는 FAIRCHILD사의 FDP22N50N(500V, 22A, 185mΩ)으로 정한다. 또한 출력부의 출력커패시턴스 C_{out} 은 커패시턴스의 전압근사식에 의하여 다음의 식 (18)과 같이 구한다.

$$C_{out} = \frac{V_{out}DT_s}{R\Delta v_{out}} = 37.5\mu F \quad (18)$$

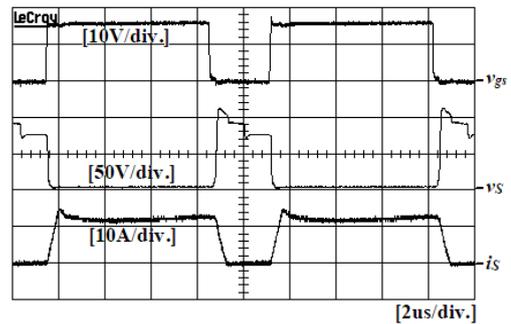
여기서 R 은 최대 출력전력 P_{max} 시의 부하저항 $R=200\Omega$ 을 대입하고 듀티비 D 는 공칭 최대 듀티비 $D=D_{nom}$ 으로 두며, 출력 리플전압 Δv_{out} 은 $\Delta v_{out}=0.1V$ 로 설정하여 계산한다. 따라서 충분한 설계여유를 고려하여 내압 450V의 150μF의 커패시터 2개를 직렬 연결하여 출력커패시턴스 C_{out} 으로 이용한다(최종 실제 내압 900V, $C_{out}=75\mu F$).

프로토타입의 제어기로는 고정주파수로 동작하며 100% 스위치 듀티비가 가능한 PWM 제어 IC인 KA3842를 이용한다.

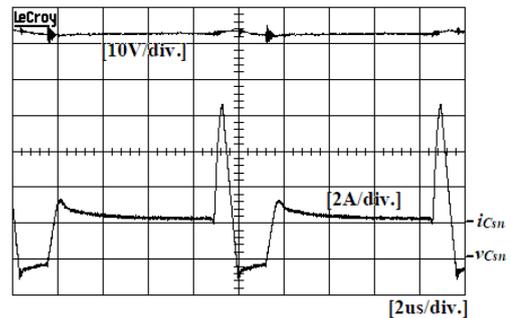
IV. 실험 결과

본 절에서는 III절에서 설계한 회로파라미터들에 근거하여 제작된 프로토타입을 이용한 실험결과들을 제시하고 분석한다.

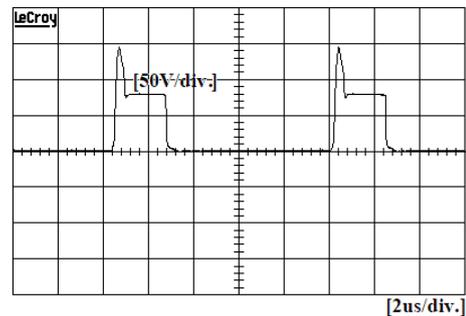
그림 5는 최대 출력전력 시 프로토타입 주스위치부의 실험파형이다. 그림 5(a)는 주스위치 S와 관련된 파형으로 스위치 게이트 구동전압 파형 v_{gs} , 스위치 전압파형 v_s , 스위치 전류 파형 i_s 를 보인다. 그리고 그림 5(b)는 LCD 스너버의 커패시터 전압 v_{Csn} 과 커패시터 전류 i_{Csn} 을 보인다. 또한 그림 5(c)는 비교를 위하여 LCD 스너버를 적용하지 않고 동작시킨 컨버터(탭형 인덕터만 적용한 전통적 방



(a) Waveforms related to the main switch.
(a) 주스위치와 관련된 파형



(b) Waveforms of LCD snubber capacitor.
(b) LCD 스너버 커패시터의 파형



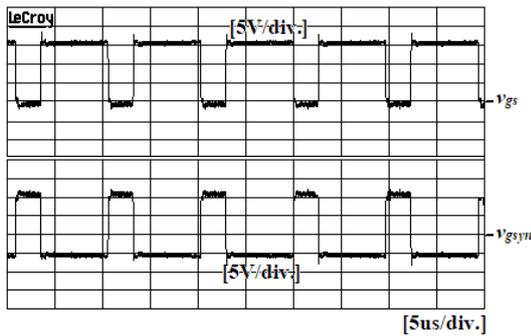
(c) Waveform of main switch voltage without LCD snubber.
(c) LCD 스너버가 없는 주스위치의 전압 파형

Fig. 5. Waveforms of the main switch part of prototype with the maximum oupt power.

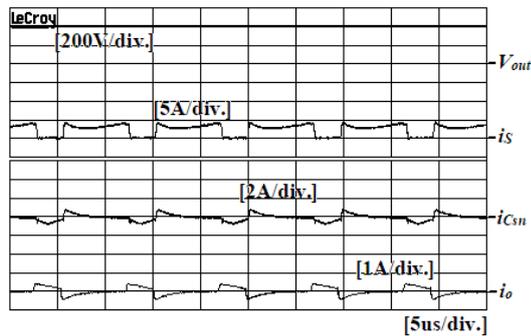
그림 5. 최대 출력전력 시 프로토타입 주스위치부의 실험 파형

식의 증압형 컨버터) 주스위치의 전압파형이다. 그림 5(a)와 (c)의 각 스위치 전압파형을 비교해 보면 전압 스파이크가 약 30% 정도 완화되었음을 확인할 수 있다. 이로부터 제한한 컨버터의 LCD 스너버는 주스위치의 전압스트레스를 완화하고 주스위치의 스위칭 손실 감소 특성이 있음을 알 수 있다.

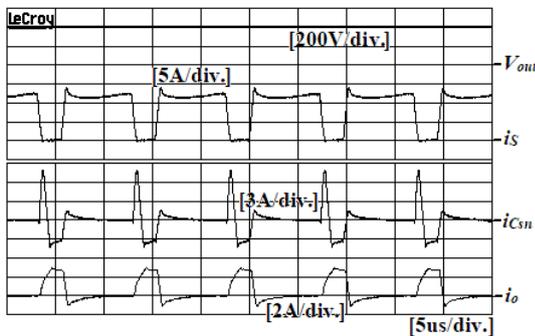
그림 6은 동기스위치의 동작과 경부하(최대 출력부하의 10%) 시 및 최대 출력부하 시의 컨버터 주요부의 실험파형이다. 그림 6(a)는 주스위치의 구동신호와 동기스위치의 구동신호를 보인다. 동기스



(a) Driving signals of the main switch and synchronous switch.
(a) 주스위치와 동기스위치의 구동신호



(b) Experimental waveforms at light load.
(b) 경부하 시의 실험파형



(c) Experimental waveforms at the maximum output load.
(c) 최대 출력부하 시의 실험파형

Fig. 6. Synchronous switch operation and experimental waveforms of the converter main part with each load
그림 6. 동기스위치의 동작과 각 부하 시의 컨버터 주요부의 실험파형

위치의 구동신호가 주스위치의 구동신호와 잘 동기되어 양호하게 동작하므로, 이로부터 동기스위치가 안정되게 잘 동작함을 알 수 있다. 또한 그림 6(b)와 (c)는 각각 경부하와 최대 출력부하 시의 주요부의 실험파형을 보인다. 부하의 변화 조건 하에서도 제안한 컨버터가 안정되게 동작함을 알 수 있다.

따라서 그림 5와 6으로부터 제안한 컨버터의 실제 동작이 II절의 이론적 동작 설명과 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 7은 전통적인 방식(●)과 탭형 인덕터와 LCD 스너버만 적용된 방식(▲), 그리고 제안한 방식(■)의 컨버터들의 각 효율을 비교한 그래프이다. 이로부터 제안한 컨버터의 효율이 가장 우수함을 확인할 수 있다.

그림 8은 제안한 컨버터 프로토타입의 실물사진이다.

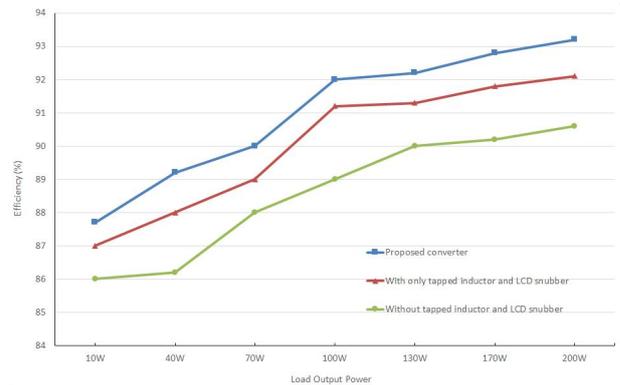


Fig. 7. Efficiency Comparison among similar type converters.
그림 7. 유사 방식 컨버터들의 효율 비교

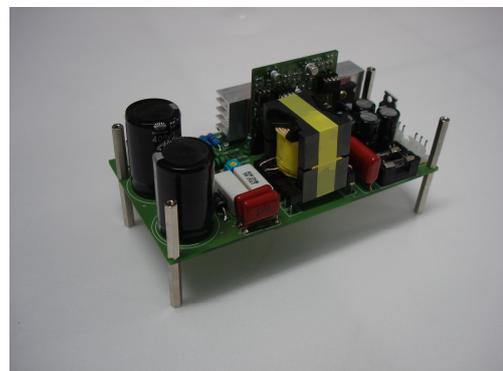


Fig. 8. Prototype of the proposed converter.
그림 8. 제안한 컨버터의 프로토타입

V. 결론

본 논문에서는 자기구동 동기스위치를 이용한 비절연 고효율 고전압출력 DC-DC 컨버터를 제안하였다. 제안한 컨버터는 고전압출력을 얻기 위하여 탭형 인덕터를 이용하였다. 하지만 탭형 인덕터는 그 구조적 한계에 의하여 필연적으로 누설 인덕턴스를 포함하므로, 이로 인한 컨버터 주스위치의 전압스트레스가 크게 되는 단점이 있다. 그리하여 제안한 컨버터는 커패시터와 다이오드로 이루어진 LCD 스너버를 이용하여 손실이 없이 컨버터 주스

위치의 전압스트레스를 저감하였다. 또한 제안한 컨버터는 컨버터의 출력부에 단순한 구동회로로 동작하는 자기구동 동기스위치를 적용하여 출력다이오드를 대체함으로써 다이오드의 역회복 문제를 해결하고 효율을 향상하였다. 본 논문에서는 먼저 제안한 컨버터의 동작원리를 설명하고 프로토타입의 설계예를 제시하였으며, 설계된 각 회로파라미터에 의해 제작된 프로토타입의 실험결과를 제시하여 제안한 컨버터의 동작특성을 보였다. 프로토타입의 최고 효율은 최대 출력부하 시 약 93.2%였다.

References

- [1] R. Gules, L. L. Pfitscher and L. C. Franco, "An Interleaved Boost Dc-Dc Converter with Large Conversion Ratio," in *Proc. of 2003 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2003)*, pp.411-416, 2003.
DOI: 10.1109/ISIE.2003.1267284
- [2] S. S. Park, S. W. Choi, W. J. Choi and K. B. Lee, "A Non-isolated DC-DC Converter with High Step-up Ratio and Wide ZVS Range," *Trans. Korean Inst. Power Electron.*, vol.14, no.4, pp. 315-322, 2009.
- [3] F. J. Nome and I. Barvi, "A ZVS Clamping Mode-Current-Fed Push-Pull DC-DC Converter," in *Proc. of IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE'98)*, pp.617-626, 1998.
DOI: 10.1109/ISIE.1998.711684
- [4] R. Gules and I. Barvi, "A High Efficiency Isolated DC-DC Converter with High-Output Voltage for TWTA Telecommunication Satellite Applications," in *Proc. of 2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC 2001)*, pp.1982-1987, 2001.
DOI: 10.1109/TPEL.2003.813762
- [5] M. Pridente, L. L. Pfitscher, G. Emmendoerfer E. F. Romaneli and R. Gules, "Voltage Multiplier Cells Applied to Non-Isolated DC-DC Converters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol.23, no.2, pp.871-887, 2008.
DOI: 10.1109/TPEL.2007.915762
- [6] D. A. Grant, Y. Darroman and J. Suter, "Synthesis of Tapped-Inductor Switch-Mode Converters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol.22, no.5, pp.1964-1969, 2008.
DOI: 10.1109/tpel.2007.904215
- [7] T. J. Lin, J. F. Chen and Y. P. Hsieh, "A Novel High Step-up DC-DC Converter with Coupled-Inductor," in *Proc. of 1st IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEC 2013)*, pp. 777-782, 2013.
DOI: 10.1109/IFEEC.2013.6687607
- [8] D. H. Yoo and G. Y. Jeong, "High Efficiency Coupled Inductor Boost DC-DC Converter using a Simple Clamp Circuit," *J. Korean Inst. IIIum. Electr. Install. Eng.*, vol.26, no.3, pp.31-39, 2012.
DOI: 10.5207/JIEIE.2012.26.3.031
- [9] M. P. Shreelakshmi, D. Moumita and A. Vivek, "Design and Development of a Novel High Voltage Gain, High-Efficiency Bidirectional DC - DC Converter for Storage Interface," *IEEE Trans. on Ind. Elec.*, vol.66, no.6, pp.4490-4501, 2019.
DOI: 10.1109/TIE.2018.2860539
- [10] Electronic Components Datasheet Search "ALLDATASHEET, FPQ3525 datasheet (PDF) - NEC," https://www.alldatasheet.co.kr/datasheet-pdf/pdf_kor/461320/NEC/FPQ3535.html

BIOGRAPHY

Gang-Youl Jeong (Member)



1997 : BS degree in Electrical Engineering, Yeungnam University.
1999 : MS degree in Electronic & Electrical Engineering, POSTECH.
2002 : PhD degree in Electronic & Electrical Engineering, POSTECH

2003~Present : Professor in Dept. of Electronic Information Engineering, Soonchunhyang University.