

탭-인덕터적용 무손실 스너버에 의한 소프트스위칭 Buck 컨버터

김은수, 박성수, 공영수, 최선호, 강도현*, 조기연*, 이진수**

전주대학교, 한국전기연구원*, 화인테크기전(주)**

Soft Switching Buck Converter Using Non-dissipative Snubber

E.S. Kim, S.S. Park, Y.S. Gong, S.H. Choi, D.H. Kang*, K.Y. Joe*, J.S. Lee**

Jeonju Uni., KERI. Fine-tech Co., Ltd.

ABSTRACT

This paper presents an improved soft switching Buck converter using an energy recovery snubber which is composed of a tapped inductor, two snubber capacitors and three snubber diodes. The proposed Buck converter achieves zero voltage turn-off in the main power switch and freewheeling diode. The operating principle of the proposed Buck converter is described through the simulation, relevant equations and analysis.

1. 서론

전력용 반도체 스위칭소자는 스위칭 시에 과도상태가 존재하고 고주파 스위칭 회로 내에는 스위칭 소자의 내부 기생 캐패시턴스, 배선 인덕턴스 존재 및 다이오드 역회복특성에 따른 스위칭 시에 전압, 전류 서지와 주 스위칭 소자 전압, 전류의 중첩으로 인한 스위칭 손실 등이 발생한다.

본 논문에서는 하드 스위칭 Buck 컨버터의 스위칭시 야기되는 스위칭 서지 및 손실을 해결하기 위한 제안된 소프트 스위칭 Buck 컨버터의 동작원리를 시뮬레이션 및 해석을 통하여 타당성을 나타내고자 한다.

2. 제안된 소프트 스위칭 Buck 컨버터

Buck 컨버터에서 최근에 적용되고 있는 소프트 스위칭 방식은 전력용 반도체 소자를 영전압에서 스위칭 하는 ZVS 방식 등이 있고, Zero Voltage Transition 방식을 이용한 Buck 컨버터 등이 있다. 그러나 이러한 기존의 방식들은 모두 동작들이 ZVS 혹은 ZCS 동작 중 하나만이 구현되고 있고 특히 여분의 능동소자가 적용되어 컨버터의 내구성 낮고 구성이 복

잡해지는 단점이 있다.

본 논문에서는 Turn-on 손실 및 Turn-off 손실을 저감하기 위해 기존 Buck 컨버터에 Turn-on 스너버 및 Turn-off 스너버 기능을 갖는 탭-인덕터 적용 에너지 회생형 스너버가 사용된 소프트 스위칭 Buck 컨버터를 제안하였다.

Turn-on 스너버 기능은 프리휠링 다이오드 D_f 와 직렬로 탭-인덕터 2차권선 L_{f2} 를 적용하고, 스너버 커패시터 C_{s1} , C_{s2} 에 따른 저임피던스 경로를 제공함으로써 구현된다.

Turn-off 스너버 기능은 스너버 커패시터 C_{s1} , C_{s2} 에 충전된 전압의 방전에 따라서 주 스위칭 소자 S 및 프리휠링 다이오드 D_f 에 영전압 스위칭을 제공한다. 즉, Turn-on ($t_1 \sim t_3$) 구간에 스너버 커패시터 C_{s1} 은

$$V_{in} + \frac{n_1}{n_2} \cdot (V_{in} - V_o) \text{ 전압으로 } C_{s2} \text{는 입력전압 } V_{in} \text{으로}$$

충전되고, Turn-off시 ($t_4 \sim t_6$) 스너버 커패시터 C_{s1} , C_{s2} 의 방전전압에 따라 주 스위칭 소자 S에 걸리는 Turn-off 서지 전압이 억제됨으로써 소프트 스위칭되는 특성을 갖는 소프트 스위칭 Buck 컨버터를 제안하고자 한다. 회로의 동작 주기에 따라 6가지 모드로 나누어 그림 2와 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

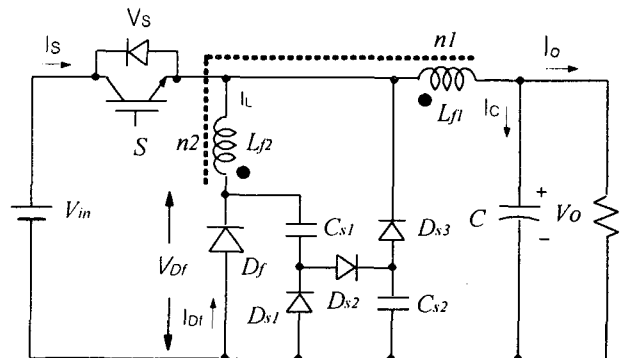


그림 1. 탭-인덕터적용 에너지 회생형 스너버를 갖는 제안된 소프트 스위칭 Buck 컨버터

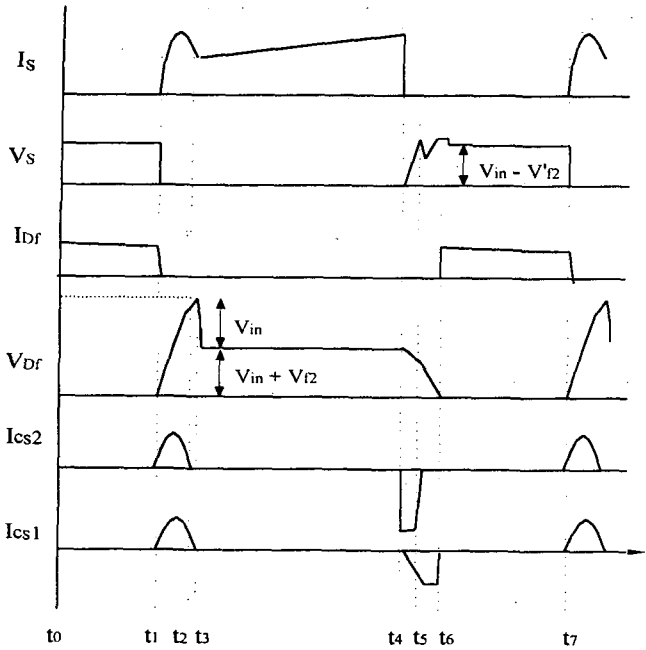


그림 2 탭-인덕터적용 에너지 회생형 스너버가 사용된 ZVZCS Buck 컨버터의 각부 동작 파형

모드 0 ($t_0 \sim t_1$) :

주 스위칭소자가 Turn-on에 앞서 프리휠링 상태이며 스너버 커패시터 C_{s1} , C_{s2} 는 0전압으로 방전되어 있고 인덕터에 흐르는 전류변화는 다음과 같다.

$$\frac{dI_{L1}}{dt} = -\frac{V_o}{(L_{L1} + L_{L2})}$$

여기서, L_{L1} , L_{L2} : 탭-인덕터 1, 2차측 인덕턴스

모드 1 ($t_1 \sim t_3$) :

주 스위칭소자 S가 t_1 시점에서 Turn-on 되고 이 시점에서 프리휠링 다이오드 D_r 와 탭-인덕터 2차권선 L_{L2} 에 입력전압이 인가된다. 입력전압의 역바이어스 전압에 의해 프리휠링 다이오드 D_r 와 탭-인덕터 2차권선 L_{L2} 를 통해 흐르던 순환전류(Free-wheeling Current)는 0로 저감되면서, $L_{L2} \rightarrow C_{s1} \rightarrow D_{s2} \rightarrow C_{s2}$ 의 저 임피던스 경로를 통해 공진전류 I_{cs} 가 흐른다. 따라서, 프리휠링 다이오드 D_r 는 역회복 특성에 따른 단락피크전류없이 영 전압에서 Turn-off 된다.

이때 공진전류는 다음과 같다.

$$I_{cs}(t) = \left(V_{in} + \frac{n_1}{n_2} \cdot (V_{in} - V_o) \right) \cdot \sqrt{\frac{C_{s1} \cdot C_{s2}}{(C_{s1} + C_{s2}) \cdot L_{L2}}} \cdot \sin \sqrt{\frac{C_{s1} + C_{s2}}{L_{L2} \cdot (C_{s1} \cdot C_{s2})}} \cdot t$$

여기서, C_{s1} , C_{s2} : 스너버 커패시터,

L_{L2} : 탭-인덕터 2차측 누설인덕턴스

n_1 , n_2 : 탭-인덕터 1, 2 차측 턴수

스너버 커패시터 C_{s1} , C_{s2} 에 충전된 전압 $V_{cs1}(t)$, $V_{cs2}(t)$ 이 입력전압 V_{in} 과 같아졌을 때 t_2 시점 이후 스너버 커패시터 C_{s2} 는 스너버다이오드 D_{s3} 가 입력전압에 의해 역바이어스 되어 있기 때문에 더 이상 충전되지 않고 $V_{cs2}(t)$ 의 전압은 입력전압 V_{in} 으로 Clamp되고, 스너버 커패시터 C_{s1} 에 충전된 전압 $V_{cs1}(t)$ 은 입력전압 V_{in} 보다 더 충전되어 탭-인덕터 1차 측에서 2차측으로 Reflect된 탭-인덕터 2차 권선전압 $[V_{in} + \frac{n_1}{n_2} \cdot (V_{in} - V_o)]$ 만큼 더 충전되면 이 모드는 끝난다.

$$V_{cs1}(t) = \left(V_{in} + \frac{n_1}{n_2} \cdot (V_{in} - V_o) \right) \cdot \frac{C_{s2}}{(C_{s1} + C_{s2})} \cdot \cos \sqrt{\frac{C_{s1} + C_{s2}}{L_r \cdot (C_{s1} \cdot C_{s2})}} \cdot t$$

$$V_{cs2}(t) = \left(V_{in} + \frac{n_1}{n_2} \cdot (V_{in} - V_o) \right) \cdot \frac{C_{s1}}{(C_{s1} + C_{s2})} \cdot \cos \sqrt{\frac{C_{s1} + C_{s2}}{L_r \cdot (C_{s1} \cdot C_{s2})}} \cdot t$$

$$V_{Dr}(t) = V_{cs1}(t) + V_{cs2}(t) = V_{in} - V_{L2}(t)$$

$$V_{L2}(t) = V_{in} - (V_{cs1}(t) + V_{cs2}(t))$$

모드 1동안 프리휠링 다이오드 D_r 에 $V_{cs1}(t_3)$ 와 $V_{cs2}(t_3)$ 의 합 전압이 인가되고, C_{s1} , C_{s2} 가 같다면 t_3 에서의 프리휠링 다이오드 D_r 에 인가된 피크 전압은 다음과 같다.

$$V_{cs1}(t_3) = V_{in} + \frac{n_1}{n_2} \cdot (V_{in} - V_o)$$

$$V_{cs2}(t_3) = V_{in}$$

$$V_{Dr}(t_3) = 2V_{in} + \frac{n_1}{n_2} \cdot (V_{in} - V_o)$$

모드 2 ($t_3 \sim t_4$) :

탭-인덕터 2차권선 L_{L2} 과 스너버 커패시터에 흐르는 공진 전류가 영으로 된 뒤 스위칭 소자 S에 흐르는 입력전류는 탭-인덕터 1차권선 L_{L1} 을 경유하여 모두 부하로 전달되고 다음 Turn-off시 때 까지 계속 아래 식의 기울기 변화로 상승하며 흐른다. 이 모드를 Powering Mode라 한다.

$$\frac{dI_{L2}}{dt} = \frac{V_{in} - V_o}{L_{L2}}$$

이 때 탭-인덕터 2차권선에 인가된 전압은 다음과 같다.

$$V_{L2} = \frac{n_1}{n_2} \cdot (V_{in} - V_o)$$

모드 3 ($t_4 \sim t_5$) :

주 스위칭 소자 S의 Turn-off시 이 모드는 시작되고, 먼저 C_{S2} 에 충전된 전압 $V_{CS2}(t)$ 이 $C_{S2} \rightarrow D_{S3} \rightarrow L_{f1} \rightarrow C_0$ 를 통해 방전되고 이때, Turn-off 시점에서 입력전압 V_{in} 과 스너버 커패시터 C_{S2} 에 충전된 전압 $V_{CS2}(t)$ 이 같으므로 영전압 조건아래에서 주 스위칭소자 S가 Turn-off 된다.

모드 4 ($t_5 \sim t_6$) :

이 모드는 C_{S2} 에 충전된 전압이 방전된 후 시작되고, C_{S1} 에 충전된 전압이 $D_{S1} \rightarrow C_{S1} \rightarrow L_{f2} \rightarrow L_{f1} \rightarrow C_0$ 를 통해 방전을 시작한다.

모드 5 ($t_6 \sim t_7$) :

이 모드는 C_{S1} 과 C_{S2} 의 전압이 0전압으로 방전 된 후 탭-인덕터에 축적된 에너지는 프리휠링 다이오드 D_f 와 $L_{f2} \rightarrow L_{f1} \rightarrow C_0$ 와 부하를 통해 흐르면서 순환한다. 이때, 주 스위칭소자 S에 인가된 전압 V_S 와 탭-인덕터 2차 측 권선전압 V'_{L2} 은 각각

$$V_S = V_{in} - V'_{L2}$$

$$V'_{L2} = \frac{n_2}{n_1 + n_2} \cdot V_o$$

이고, 탭-인덕터 2차측 권선전압 V'_{L2} 에 의해 스너버 다이오드 D_{S1} 과 D_{S2} 는 역바이어스되고 이곳으로 순환전류가 흐르지 않는다. 다시 주 스위칭소자 S가 Turn-on 되면 이후 동작은 앞서 설명된 동작을 반복한다.

그림 4는 탭-인덕터적용 에너지 회생형 스너버가 사용된 제안된 소프트 스위칭 Buck 컨버터의 시뮬레이션 파형이다. 주 스위칭 소자는 기존의 영전압 스위칭 방식과 마찬가지로 영 전압 스위칭 됨을 볼 수 있고, 프리휠링 다이오드 D_f 는 인덕터 L_f 와 스너버 커패시터 C_{S1} , C_{S2} 의 저 임피던스 제공에 따라 영 전압 스위칭 된다. 시뮬레이션 파형에서 처럼 주 스위칭소자 S 및 Freewheeling 다이오드 D_f 가 영전압에서 Turn-off 됨으로써 스위칭손실저감과 함께 소자에 가해지는 전압, 전류 스트레스를 저감시킬 수 있음을 보여준다.

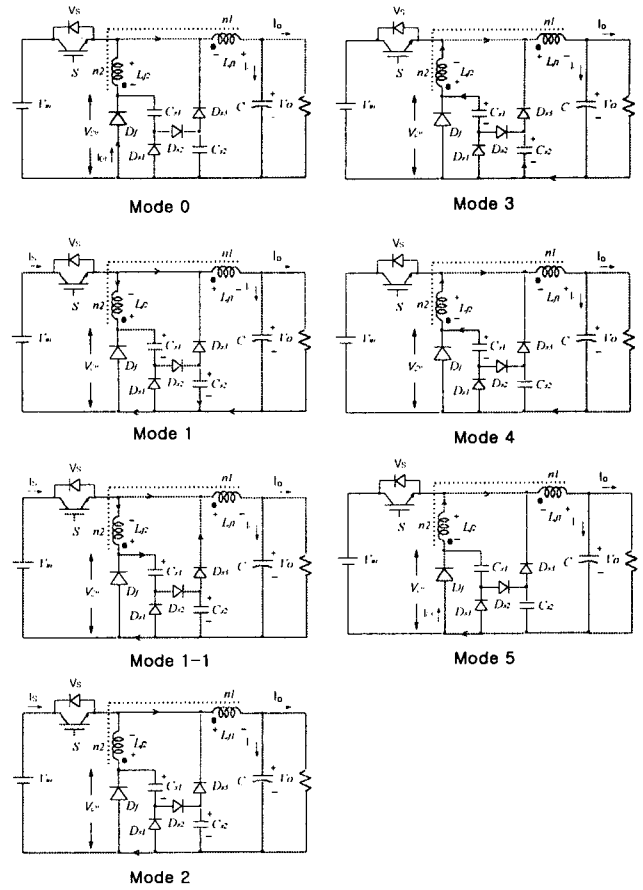


그림 3. 동작 Mode에 대한 회로 구성

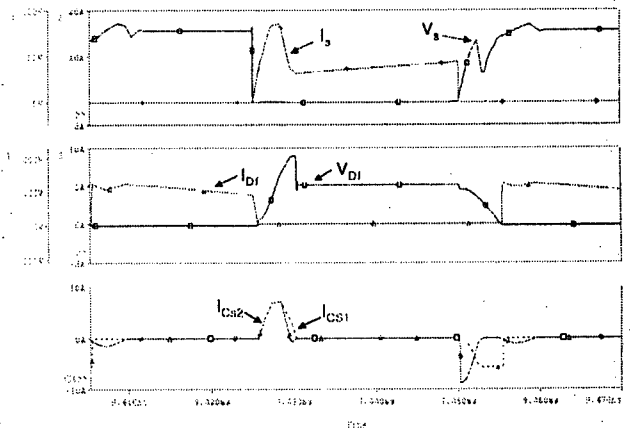


그림 4. 에너지 회생형 스너버가 적용된 ZVZCS Buck 컨버터의 시뮬레이션 파형

3. 결 론

본 논문에서는 Buck 컨버터에서 가장 큰 난제로 지적되어온 주 스위칭소자의 소프트 스위칭 동작을 구현 하고자 능동 소자를 이용하지 않는 새로운 방식의 소프트 스위칭 Buck 컨버터 Topology를 제안하고, 각 동작모드에 대한 해석과 이론적인 고찰을 행하였으며 시뮬레이션을 통해 그 가능성을 확인하였다.

이 논문은 한국전기연구원 2002년 기관고유사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었습

참 고 문 헌

- [1] L.G. Mearesed, Improved Non-Dissipative Snubber Design for Buck Regulators and Current-Fed inverters, Proceeding of Powercon 9,1982.
- [2] E.S. Kim, K.Y. Joe, G.H. Rim, A 12kW Switching Mode Power Supply with Free Input-Voltage, IEEE APEC, 1994.
- [3] X. He, S.J. Finney, B.W. Williams, T.C. Green, "An Improved Passive Lossless Turn-on and Turn-off Snubber", IEEE APEC, 1993, pp.385~392.
- [4] Kunrong Wang, Fred C Lee, Xinxiang Yan and Dushan Boroyevich, "A New QUASI-SINGLE-STAGE Isolated Three-Phase ZVZCS Buck PWM Rectifier", pp.3-8, Virginia Power Electronics Center in U.S.A, Annual Report, 1995.
- [5] J. A. C Pinto, A. A. Pereira, V. J. Farias, L. C. de Freitas, "A New Boost Converter Using A Non-Dissipative Snubber", APEC, 1996. pp. 397~401.
- [6] K.M Smith, K.M. Smedely, "Engineering Design of Lossless Passive Soft Switching Methods for PWM Converters", IEEE APEC, 1998, pp. 1055~1062.
- [7] T. Ninomiya, T. Tanaka, K. Harada, "Analysis and Optimization of a Non-dissipative LC Turn-Off Snubber", IEEE PE, 1988.
- [8] A. A. Pereira, E. A. A Coelho, V. J. Farias, L. C. de Freitas, "A New ZC-ZVS Forward Converter", APEC, 1996.