

포워드 컨버터를 위한 스너버 회로에 대한 고찰

김 만고, 이 건용, 정영석, 김 남호, 황용연
부경대학교

Investigation on Snubber Circuits for Forward Converters

Marn-Go Kim, Kun-Yong Lee, Young-Seok Jung, Nam-Ho Kim, and Yong-Yeon Hwang
Pukyong National University

ABSTRACT

본 논문에서는 기존의 에너지 회생 스너버 회로에 대해 고찰하고 주 스위치 전압 스트레스 감소를 위한 최적의 트랜스포머 에너지 회수 방법을 제안한다.

1. 서론

스위칭 컨버터에서 트랜스포머는 전압의 변환 (Voltage transformation)이나 전기적 절연 (Galvanic isolation)을 위해 널리 이용되어 왔다. 그러나 트랜스포머는 두 가지 주요 문제를 일으킬 수 있다. 첫째는 자화 전류 (Magnetizing current)가 증가하는 것을 방지하기 위하여 트랜스포머 코어 (Core)가 리셋 (Reset)되어야 한다. 둘째는 트랜스포머 누설 인덕턴스 (Leakage inductor)의 방전에 의해 스위치 양단에 전압 스파이크 (Voltage spike)를 발생시켜 과전압 항복 (Over voltage breakdown)이 발생할 수 있다. 이러한 문제는 많은 연구자에 의해 다루어 졌고 현재에도 관심의 대상이다^{[1]-[6]}.

트랜스포머에서 두 가지 자속의 흐름이 존재한다. 하나는 코어를 따라 흐르는 상호 자속 (Mutual flux)으로 자화 인덕턴스 (Magnetizing inductance)의 원인이 된다. 다른 하나는 자속의 흐름이 특정 권선에 한정되는 자속으로 누설 인덕턴스 (Leakage inductance)로 표시된다. 그림 1에 트랜스포머 자속의 흐름과 손실을 무시한 등가 회로를 나타내었다. ϕ_{N1} 은 기자력 $N_1 i_1$ 에 의해 생성된 전체 자속이다. 이 자속의 일부 ϕ_{l1} 은 2차 권선 N_2 와 결합하지 않고 1차 권선 주변을 머무는 누설 자속을 형성한다. 나머지 1차 자속 ϕ_{m1} 은 코어를 따라 흐르고 2차 권선 N_2 와 결합하여 전류를 2차측으로 흐르게 하여 2차 자속 ϕ_{N2} 를 발생시킨다. ϕ_{N2} 의 일부인 ϕ_{m2} 은 1차 권선 N_1 과 결합을 하고 나머지 ϕ_{l2} 는 1차 권선과 결합하지 않고 누설되어 2차 권선의 주변에 머문다.

상호 자속에 의해 저장된 자기장 에너지는 자화 인덕터에 저장된 에너지가 되고 이 에너지는 자속이 흐르는 코어에 2차나 3차 권선을 감아 에너지 회수가 가능하다. 특정 권선 주변에만 흐르는 누설 자속에 의한 자기장 에너지는 코어에 권선을 감아 에너지를 회수할 수 없고 특정 권선에 연결된 회로로 방출을 하게 된다.

본 논문에서는 지금까지 연구되었던 트랜스포머에 저장된 에너지 회수 방법에 대해 분석해보고 최적의 에너지 회수 방법에 대해 제안을 하고자 한다.

2. 기존의 스너버 회로에 대한 고찰

포워드 컨버터의 주 스위치가 턴온 상태에서 전기에너지가 트랜스포머 1차측에서 2차측으로 전달된다. 동시에 트랜스포머의 기생 인덕턴스인 누설 인덕터나 자화 인덕터에도 전류가 흘러 에너지 축적이 일어난다. 주 스위치가 턴-오프 될 때 기생 인덕터에 저장된 에너지가 스위치 양단에 전압 스파이크를 발생시켜 과전압에 의한 반도체 스위치의 파손을 방지하기 위해 스너버 회로가 상용되어 왔다. 그림 2에 일반적으로 널리 사용되는 기존의 스너버 회로를 나타내었다. (a) RCD 스너버는 자화 인덕터 에너지와 누설 인덕터 에너지를 모두 C_s 에 일시적으로 저장된 후 R_s 에서 손실로 처리되기 때문에 효율이 저하된다. 또한 턴-오프시 하드 턴오프가 되어 턴-오프 스위칭 손실이 크게 된다. (b) 제 3권선에 의한 코어 리셋은 자화 인덕터 에너지가 전원측으로 회수되므로 RCD 스너버에 비해 효율을 향상시킬 수 있다. 그러나 누설 인덕터 에너지는 전원측으로 회수되지 못하고 누설 인덕터에 의한 전압 스파이크는 제거되지 않으므로 스위치 보호를 위해 추가적인 스너버가 필요할 수 있다. 주 스위치는 턴-오프시 하드 스위칭을 하는 단점이 있다.

자화 인덕터 에너지와 누설 인덕터 에너지를 동시에 다룰 수 있는 무손실 에너지 회생 스너버 회로가 그림 3과 같이 여러 연구자에 의해 제안되었다. (a)의 수동 LC 스너버는 S가 턴-오프시 턴-온 동안에 축적된 기생 인덕터 에너지가 C_s 로 전달된다. C_s 에 저장된 에너지는 트랜스포머 기생 인덕터를 통해 전원측으로 회생되거나 S가 턴-온 될 때 LC 공진회로를 통해 C_s 의 극성이 반전되어 S가 턴-오프시 출력측이나 기생 인덕터로 회수된다^{[1]-[2]}. S가 턴-오프시 기생 인덕터 전류는 S의 출력 커패시터와 병렬로 연결된 C_s 를 통해 흐르므로 영전압에 가까운 소프트 스위칭을 한다.

(b) 능동 클램프 리셋은 기생 인덕터 에너지가 C_s 에 저장된 후 보조 능동 스위치 S_2 를 통해 기생 인덕터로 에너지를 전달하여 출력측으로 에너지를 회수한다^{[3]-[4]}. S_1 은 영전압 턴-온을 하여 출력 커패시터에 의한 턴-온 손실이 없으나 턴-오프시 클램프 전압을 가진 하드 스위

칭을 하고 보조 능동 스위치 S_2 를 구동하는데 추가적인 에너지가 필요하다.

(c) 능동 LC 스너버는 기생 인덕터 에너지가 C_s 에 저장된 후 기생 인덕터를 통해 전원측으로 회생되거나 플라이백 트랜스포머 T_2 를 통해 제2의 출력으로 전달된다^[5]. 즉, 기생 인덕터 에너지를 공급받은 C_s 를 전원으로 하는 플라이백 컨버터가 추가된 기능을 수행한다. 플라이백 트랜스포머의 자화 인덕터가 공진 인덕터로 사용된다. 능동 스위치 S_2 에 추가적인 구동 에너지를 필요로 한다.

(d) 제 3권선을 이용한 수동 LC 스너버는 기생 인덕터 에너지가 C_s 에 저장된 후 기생 인덕터를 통해 전원측으로 회생되거나 LC 공진을 통해 C_s 의 극성이 반전되고 S 가 턴-오프시 출력측이나 기생 인덕터로 에너지가 회수된다. 제 3권선의 자화 인덕터가 공진 인덕터로 사용된다^[6]. (d)의 동작은 (a)와 유사하나 주 스위치 S가 턴-오프시에 (a)에서는 영전압에 가까운 스위칭을 하고 (d)에서는 완전한 영전압 스위칭을 한다는 점에서 다르다. (d)에서 S가 영전압 턴-오프가 가능한 것은 S가 턴-온 될 때 트랜스포머를 통해 1차 권선으로부터 제 3권선으로 에너지가 전달되어 C_s 의 전압이 반전될 때 항상 입력 전압과 같은 전압으로 충전이 이루어지기 때문이다. (a)에서는 기생 인덕터로부터 LC 공진 에너지를 받지만 (d)에서는 기생 인덕터와 트랜스포머 두 에너지원으로부터 공급받아 LC 공진을 일으킨다.

언급한 무손실 에너지 스너버 회로는 자화 인덕터 에너지와 누설 인덕터 에너지가 모두 C_s 로 저장된 후 에너지 회수 과정을 수행하므로 C_s 전압의 상승에 의한 스위치 전압의 스트레스가 증가한다. 스위치 전압 스트레스 감소를 위해 큰 C_s 를 사용할 수 있으나 큰 C_s 는 순환 전류 (Circulating current)를 증대시켜 도통 손실을 증대시키는 요인이 된다^{[11]-[12]}. 순환 전류에 의한 도통 손실을 줄이기 위해 작은 C_s 를 사용하면서 스위치 전압 스트레스를 제한할 수 있는 트랜스포머 기생 인덕터 에너지 회수 과정이 필요하다.

참고 문헌

- [1] T. Ninomiya, T. Tanaka, and K. Harada, " Analysis and optimization of a nondissipative LC turn-off snubber, " *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 3, no. 2, pp. 147 – 156, Apr. 1988.
- [2] T. Tanaka, T. Ninomiya, and K. Harada, " Design of a nondissipative turn-off snubber in a forward converter, " in *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, 1988, pp. 789-796.
- [3] Q.M. Li, F.C. Lee, and M.M. Jovanovic, " Large-signal transient analysis of forward converter with active-clamp reset , " *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 17, no. 1, pp. 15 – 24, Jan. 2002.
- [4] S.S. Lee, S.W. Choi, and G.W. Moon, " High-efficiency active-clamp forward converter with transient current build-up(TCB) ZVT technique, " *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 1, pp. 310 – 318, Feb. 2007.
- [5] M. Jinno, P.Y. Chen, and K.C. Lin, " An efficient active LC

snubber for forward converters, " *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 6, pp. 812 – 820, Jun. 2009.

- [6] A. Abramovitz, T. Cheng, and K. Smedley, " Analysis and design of forward converter with energy regenerative snubber, " *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 3, pp. 667 – 676, Mar. 2010.

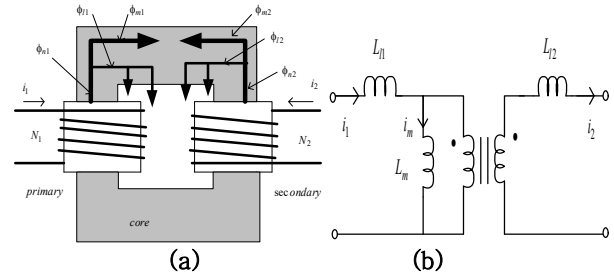
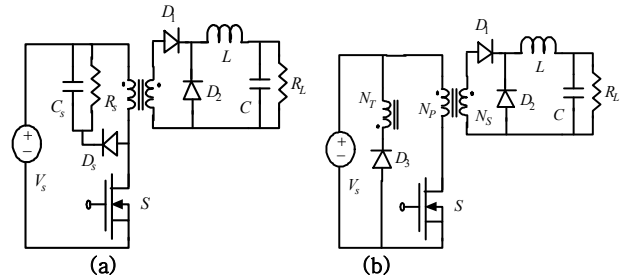
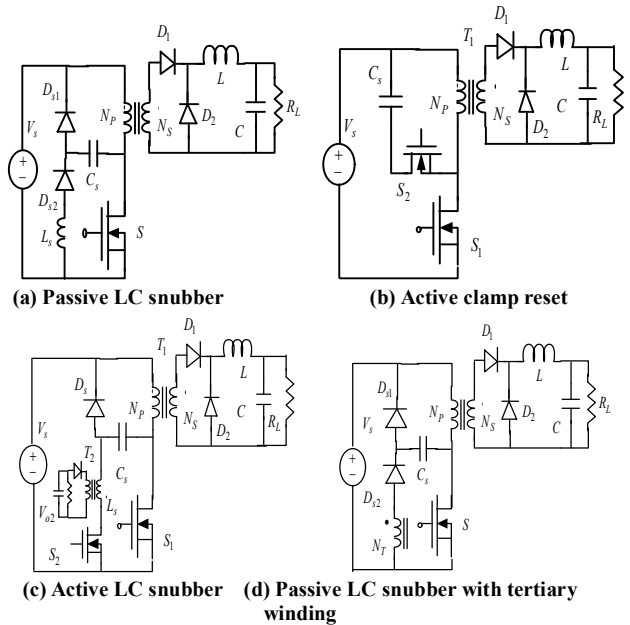


그림 1 트랜스포머에서 자속의 흐름 (a) 과 등가회로 (b)
Fig. 1 Transformer's flux paths (a) and equivalent circuit (b)



(a) Resistor, capacitor, and diode (RCD) Clamp (b) Core reset with tertiary winding

그림 2. 기존의 스너버 회로
Fig. 2 Conventional snubber circuits



(a) Passive LC snubber (b) Active clamp reset
(c) Active LC snubber (d) Passive LC snubber with tertiary winding
그림 3. 무손실 에너지 회생 스너버 회로
Fig. 3 Nondissipative energy recovery snubber circuits