출력 전류 리플이 없는 소프트 스위칭 승압 컨버터

김세진, 도현락
서울과학기술대학교

Soft-Switching Step-up converter with Ripple-Free Output Current

Kim Se Jin, Do Hyun Lark
Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문은 출력 전류 리플이 없는 소프트 스위칭 승압 컨버터를 제안한다. 제안하는 컨버터는 결합 인덕터와 보조 커패시터와 보조 인덕터를 사용하여 스위치의 영전압 스위칭이 가능하도록 하여 스위칭 손실을 줄이고 출력 전류 리플을 제거하였다. 제안하는 회로의 동작원리를 설명하고, 시뮬레이션으로 확인한 후 60[W]급 하드웨어 시작품을 이용하여 검증하였다.

1. 소 개

최근에 저전압 배터리를 사용하는 휴대용 전력시스템의 수요가 증가하고 있다. 이러한 휴대용 전력시스템들은 경량, 소형, 작은 출력 리플 등이 요구된다. 또한, 이 시스템들은 낮은 입력 전압을 승압하여 적절한 출력전압으로 일정하게 유지하고 출력 전압 리플을 특정한 기준 이하로 유지할 필요가 있다 [1].

출력 전압 리플을 줄이기 위해, 하나의 방법은 출력 단에 큰 LC필터를 사용하는 것이다. 그러나 이 방법은 시스템의 크기와 무게를 증가시킨다. 전압 리플을 줄이는 다른 방법은 고주파수로 동작시키는 것이다. 하지만 이는 하드 스위칭 동작을 하는 기존의 부스트, 벅부스트 컨버터에서 스위칭 손실을 증가시켜 효율을 감소시킨다. 인터리빙 기법이 전압 리플을 줄이고 전력용량을 늘리기 위해 활용되지만 출력 전압 리플을 줄이기 위해 많은 부품수가 필요하고 컨트롤 알고리즘이 복잡해진다 [2].

[1]에 제시된 KY 컨버터는 빠른 응답속도, 연속적인 출력전류, 입력전압으로 클램핑되는 스위치 전압 등의 장점을 가진다. 하지만 출력 전압 리플을 줄이는데 기여하는 출력 전류 리플을 줄이기 위해 큰 용량의 출력 인덕터를 사용하여야 하고 하드 스위칭 동작으로 인한 스위칭 손실 때문에 효율이 낮아진다.

제안하는 컨버터에서는 보조 회로를 활용하여 스위치의 영전압 스위칭이 가능하도록 하여 스위칭 손실을 줄여서 효율을 증가시켰고 또한 출력 인덕터 전류 리플을 제거하였다. 제안하는 회로의 동작특성을 분석하고 실제 하드웨어 실험을 통하여 분석한 회로의 동작특성을 확인하였다. 그리고 기존의 컨버터와 실험을 통하여 효율비교를 하였다.

2. 이론적 해석

2.1 제안하는 컨버터의 구조

그림 1은 제안하는 출력 전류 리플이 없는 소프트 스위칭 승압 컨버터이다. 기존 KY 컨버터 구조에서 출력 인덕터에 추가로 N_s를 감아서 만든 결합 인덕턴스 L_c와 시리얼 인덕터L_s, 그리고 보조 커패시터C_a가 추가되었다.

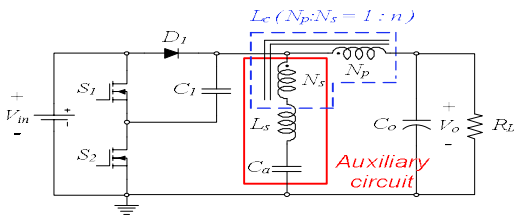

그림 1 제안하는 소프트 스위칭 승압 컨버터

결합 인덕턴스 L_c는 자화 인덕턴스 L_m과 N_p:N_s(=1:n)의 턴 비를 가지는 이상적인 트랜스포머로 모델링을 하였다. 결합 인덕턴스 L_c의 누설 인덕턴스는 시리얼 인덕터 L_s에 포함 되었다. 커패시터 C_a와 C_1이 충분히 크다면, C_a와 C_1은 스위칭 주기 동안 각각 전압원 V_{Ca}, V_{C1}로 간주할 수 있다. 정상상태에서 인덕터에 걸리는 평균 전압은 0 이어야 하기 때문에 커패시터 C_a에 걸리는 전압 V_{Ca}의 평균은 출력 전압 V_o와 같게 되고, 모드5-6에서 V_{C1}=V_{in}이므로 커패시터 C_1의 걸리는 전압 V_{C1}의 평균은 입력 전압 V_{in}과 같게 된다.

2.2 제안하는 컨버터의 동작특성

제안하는 컨버터는 스위칭 한 주기 동안 6개의 동작 모드로 나눌 수 있으며 그림 2에 이론적인 파형을, 그림 3에 동작모드를 나타내었다.

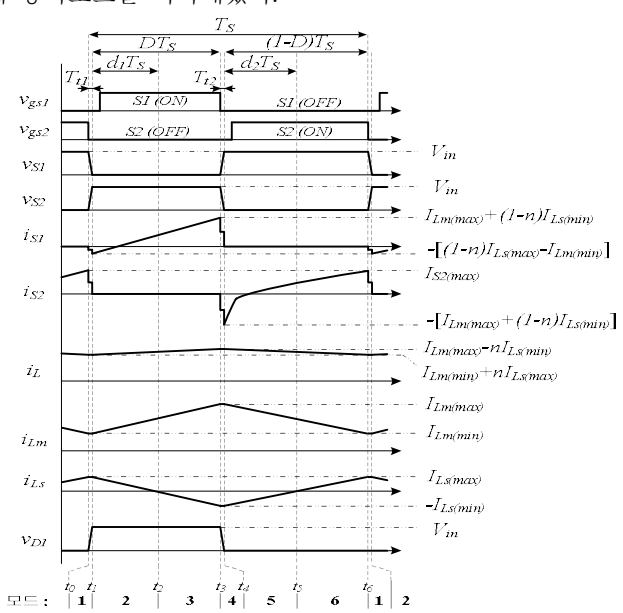

그림 2 제안하는 컨버터의 이론적인 파형

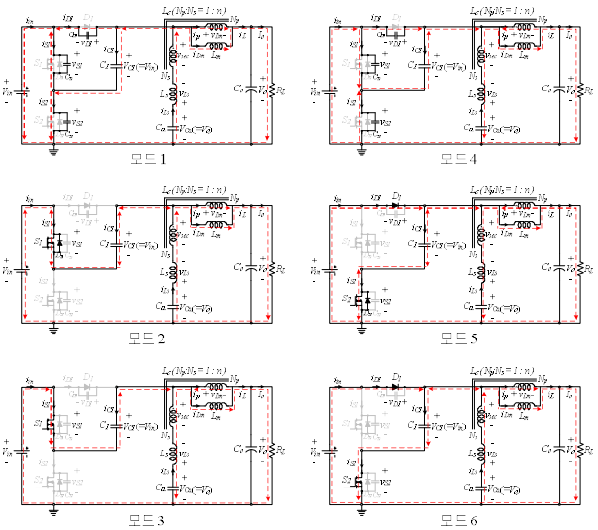

그림 3 제안하는 컨버터의 동작모드

모드 1 [t_0, t_1]: 스위치 S_2가 off되었을 때, 전류 i_{Ls}-i_L에 의해 스위치 S_1의 전압은 감소하고 스위치 S_2와 다이오드 D_1의 전압은 증가한다.

모드 2 [t_1, t_2]: 게이트 신호가 인가되기 전에, 스위치 S_1의 전압이 0에 도달하여 내부다이오드가 도통이 되어 S_1의 영전압 스위칭이 성취된다. 그리고 자화 인덕턴스 L_m과 시리얼 인덕터 L_s에 걸리는 각각의 전압은 $2V_{in}$-V_o, $-(1-n)(2V_{in}-V_o)$이 되어 i_{Lm}은 증가하고 i_{Ls}는 감소한다.

$$i_L(t)=I_{Lm(\min)}+nI_{Ls(\max)}+\left(\frac{2V_{in}-V_o}{L_m}-\frac{n(1-n)(2V_{in}-V_o)}{L_s}\right)(t-t_1) \quad (1)$$

수식 (1)에서 출력 전류 리플은 제거될 수 있고, 다음의 조건을 만족하면 입력 전류는 $I_{Lm(min)}+nI_{Ls(max)}$ 으로 일정해진다.

$$L_s=n(1-n)L_m \quad (2)$$

모드 3 [t_2, t_3]: t_2에서 i_{Ls}는 0이 되고 전류방향이 바뀐다. 각 소자에 걸리는 전압이 변하지 않으므로 각각 전류들은 모드2와 동일한 기울기로 증가하고 감소한다.

모드 4 [t_3, t_4]: 스위치 S_1이 off되었을 때, 전류 i_{Ls}-i_L에 의해 스위치 S_2의 전압과 다이오드 D_1의 전압은 감소하고 스위치 S_1의 전압은 증가한다.

모드 5 [t_4, t_5]: 게이트 신호가 인가되기 전에, 스위치 S_2의 전압이 0에 도달하여 내부다이오드가 도통이 되어 S_2의 영전압 스위칭이 성취된다. 그리고 자화 인덕턴스 L_m과 시리얼 인덕터 L_s에 걸리는 각각의 전압은 $-(V_o-V_{in})$, $(1-n)(V_o-V_{in})$이 되어 i_{Lm}은 감소하고 i_{Ls}는 증가한다.

$$i_L(t)=I_{Lm(\max)}-nI_{Ls(\min)}+\left(-\frac{V_o-V_{in}}{L_m}+\frac{n(1-n)(V_o-V_{in})}{L_s}\right)(t-t_4) \quad (3)$$

수식 (2)에 의해 수식 (3)의 리플은 제거될 수 있고, 입력 전류는 $I_{Lm(max)}$-$nI_{Ls(min)}$ 으로 일정해진다.

모드 6 [t_5, t_6]: t_5에서 전류 i_{Ls}는 0이 되고 전류방향이 바뀐다. 각 소자에 걸리는 전압이 변하지 않으므로 각각 전류들은 모드5와 동일한 기울기로 증가하고 감소한다.

표 1 실험에 사용한 컨버터의 설계사양

V_{in}	50 [V_{DC}]	V_o	70 [V_{DC}]
f_s	200 [kHz]	$P_{o(max)}$	60 [W]
L_m	178 [μH]	C_1	470 [μF]
L_s	19.4 [μH]	C_a	6.6 [μF]
n	1/8 [Turn]	C_o	220 [μF]

3. 실험결과

표1은 실험에 사용된 제안하는 컨버터의 설계 사양이다. 그림 4는 제안하는 컨버터의 동작 파형과 측정된 효율이다. 그림 4의 (a)와 (b)는 각각 스위치S_1, S_2의 영전압 스위칭 동작을 보여준다. 그림 4의 (c)는 출력 필터 인덕터 및 시리얼 인덕터 L_s에 흐르는 전류, 스위치 S_1에 걸리는 전압을 나타낸다. 실험 결과, 동일한 설계사양으로 [1]에서 제안한 컨버터에서는 약 0.4[A] 리플을 가지는 반면, 제안하는 컨버터는 출력 전류의 리플이 완전히 제거되었다. 그리고 결합 인덕턴스와 시리얼 인덕터, 보조 커패시터의 추가로 도통 손실이 증가하였지만, 스위치의 영전압 스위칭을 성취하여 스위칭 손실을 줄임으로써 효율을 증가시켰다. 그 결과 그림 4의 (d)에서 보이듯이, 기존의 KY 컨버터와 비교했을 때, 전체적으로 효율이 1.1%이상 증가하였다. 또, 제안하는 컨버터의 최대효율은 최대 부하에서 98.18%으로 측정되었다.

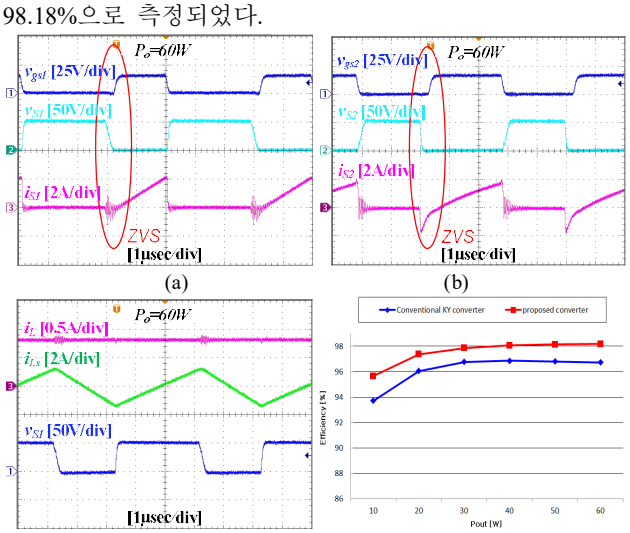

그림 4 제안하는 컨버터의 동작파형과 효율

4. 결론

본 논문에서는 출력 전류 리플이 없는 소프트 스위칭 승압 컨버터를 제안하고 이 컨버터의 동작특성과 성능을 실험을 통하여 알아보았다. 보조회로를 통해 출력 전류의 리플 성분을 거의 제거할 수 있었을 뿐만 아니라 스위치의 소프트 스위칭이 가능하여 기존의 KY 컨버터보다 향상된 효율을 보임을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

[1] K. I. Hwu and Y. T. Yau, "KY converter and its derivatives," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 1, pp. 128–137, Jan. 2009.

[2] S. Dwari and L. Parsa, "An Efficient High-Step-Up Interleaved DC–DC Converter With a Common Active Clamp," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 1, pp. 66–78, Jan. 2011.