

論文96-33B-11-18

공진회로를 이용한 고효율 Buck 컨버터의 구현

(Implementation of the high efficiency Buck converter using the resonant circuit)

林承河*, 司空石鎭**

(Seung-Ha Lim and Sug-Chin Sakong)

요 약

본 논문은 스위칭 손실을 감소시키기 위하여 개선된 Buck 컨버터 회로를 설계하고 기존의 Buck 컨버터와 비교하고 특성을 분석한다. 평활 커패시터를 이용한 Buck 컨버터는 스위치가 턴-오프될 때, 순간적인 개방 상태로 인하여 고주파 성분을 갖는 과도 전류의 흐름과 피크 전압이 발생한다. 그러나 본 논문에서 제시한 Buck 컨버터는 LC 회로를 이용함으로써 이러한 단점을 제거하였다. 그러므로 평활 커패시터를 이용한 Buck 컨버터 보다 더 높은 0.85의 역률(PF)을 얻을 수 있었다. 또한 고주파 함유율의 감소로 인하여 전류 이용률은 기존의 Buck 컨버터 보다 4.48 dB 높은 결과를 얻을 수 있었으며, 스텝 응답에 대한 출력 전압 변동률도 기존의 buck 컨버터 보다 1.32 배 낮게 되었다.

Abstract

For the decreasing of switching loss, this paper designs the improved Buck converter circuit and then compare with the conventional Buck converter and finally analyzes the performance. When the switch is turn-off, in the Buck converter using the smoothing capacitor, the flow of transient current and peak voltage having the high frequency components was generated because of the instantaneous open-state in the terminals of the switch. However, the Buck converter presented in this paper eliminated this disadvantage by using the L-C circuit. Therefore, the higher PF in 0.85 is achieved than that of the Buck converter using the smoothing capacitor. Also, due to the decreasing of the harmonic contain rate, the current usage rate is to be higher than that of the conventional Buck converter by 4.48 dB and the output voltage variant rate for the step response is to be lower 1.32 times than that of the conventional Buck converter.

I. 서 론

현재 산업, 가정, 연구등 각분야에서 사용되는 전기 에너지는 다양한 방식으로 이용되고 있으며, 그에 따라

다양한 전력 형태의 변환이 요구되고 있다. 이러한 전력 변환이 요구되는 것 중에는 무정전 전원 장치(Uninterruptable Power Supply: UPS)와 SMPS(Switching Mode Power Supply) 등이 있다. 이들 두가지의 전력 변환 시스템은 급속도로 진전되고 있는 컴퓨터 시스템과 기타의 여러 전자 시스템의 신뢰성 및 소형화에 따라 상당한 연구가 이루어지고 있다.^[1-3]

일반적인 리니어 전원 공급 장치는 공급 전력이 커지면 그것에 비례하여 평활 커패시터와 인덕터의 크기가 커지므로 이러한 단점을 극복하기 위하여 고주파 샘플링함으로써 시스템의 크기와 무게를 감소시킬 수

* 正會員, 富川專門大學 電子科

(Department of Electronics Engineering, Bucheon Technical College)

** 正會員, 國民大學校 電子工學科

(Department of Electronics Engineering, Kook-Min University)

接受日字:1995年12月26日, 수정완료일:1996年10月24日

있다. 즉, DC-DC 컨버터를 구동하는 방식중에 가장 일반적으로 사용되고 있는 PWM 방식의 컨버터는 전력 회로의 구조가 간단하고, 모델링 특성이 간단하여 제어하기가 편하며, 전력용 스위치의 전압 및 전류에 대한 스트레스가 작아서 일반 산업용을 비롯한 대부분의 전원장치에 사용되고 있다.^[4-7]

그러나 PWM 방식은 반도체 소자를 강제적으로 스위칭 시키기 때문에 고주파를 이용하여 샘플링하면 그에 따른 반송파 잡음과 스위칭 소자를 동작시키는 순간 임펄스성 잡음(noise)이 발생한다. 특히 정류된 직류단에 평활 커패시터를 적용함으로써 스위치가 턴-오프되는 순간, 높은 주파수 성분을 갖는 순간적인 단락 현상에 의하여 과도 전류가 흐르게 되는 단점을 갖는다.^[8-10]

따라서 본 논문에서 제시한 개선된 Buck 컨버터는 스위칭 소자의 스위칭 순간에 발생하는 높은 전류 크기를 일정하게 유지할 수 있도록 하기 위하여, LC 회로를 입력단에 적용함으로써 스위칭 손실을 최소화하고 입력단 소모 전력을 감소시킬 수 있었으며 전류 제어능력을 향상시킬 수 있었다. 또한 전류 이용률은 4.48 dB 높아졌고, 0.85 의 역률(PF)을 얻을수 있었다. 그리고 제시한 두 Buck 컨버터 회로의 원리와 특성을 비교하고 각각의 시스템은 시뮬레이션과 실험을 통하여 분석하였다.

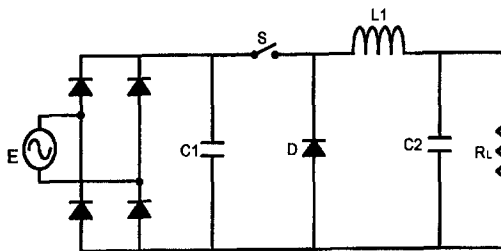


그림 1. 평활 커패시터를 추가한 Buck 컨버터 모델
Fig. 1. Buck converter model including smoothing capacitor.

II. 개선된 Buck 컨버터 구성

1. 평활 커패시터를 이용한 Buck 컨버터

일반적인 Buck 컨버터는 입력 교류전원을 전파 정류하여 입력할 경우 입력단 리플 전압이 인가 전압과 같아지며 리플 최저치에 도달할 때 직류 전압의 진폭이 감소한다. 이를 보상하기 위하여 그림 1과 같이 입

력단에 평활 커패시터를 추가한다. 따라서 평활 커패시터는 전압 리플을 감소시키는 효과를 얻을 수 있다.

그러나 평활 커패시터를 이용한 입력단 전파 정류 방식은 스위치 턴-오프시 순간적인 피크(peak) 전압 증가와 평활 커패시터에 흐르는 전류가 갑자기 증가하는 현상이 발생한다. 따라서 상용라인에서 리플 주파수가 120 Hz 일때 커패시터를 최소한 1000 μF 이상 사용하여야 하므로 시스템의 크기가 커지게 되는 단점을 가지고 있다.

2. LC 회로를 이용한 Buck 컨버터

본 논문에서는 평활 커패시터를 첨가한 Buck 컨버터의 문제점을 개선하기 위하여 평활 커패시터를 LC 회로로 대체함으로써 커패시터의 용량을 감소시키는 동시에 순간적인 커패시터 단락 현상에 의한 급격한 전류의 흐름을 방지하고 전압, 전류 제어 효율을 높일 수 있는 방식을 그림 2와 같이 제시하였다.

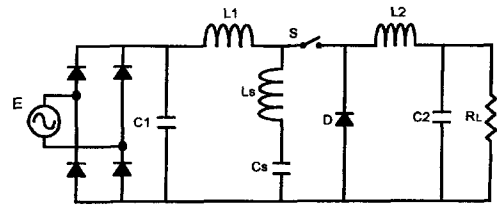


그림 2. 개선된 Buck 컨버터
Fig. 2. Improved Buck Converter.

제시한 Buck 컨버터의 동작 모드 분석은 그림 3과 같다.

그림 3(a)의 경우, L_s , C_s 에 의한 공진각 주파수 ω_0 를 갖게 되고 이때의 임피던스는 식(1)과 같이 얻어진다.

$$Z_{om} = jX, \quad (X = \omega_0 L_s - \frac{1}{\omega_0 C_s}) \quad (1)$$

따라서 공진각 주파수는 다음식과 같다.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_s \cdot C_s}} \quad (2)$$

그리고 스위칭 주파수는 $\omega_0 < \omega_s$ 이다.

또한 이때의 Q_0 는 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} Q_0 &= \frac{\omega_0 L}{R} \\ &= \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L_s}{C_s}} \end{aligned} \quad (3)$$

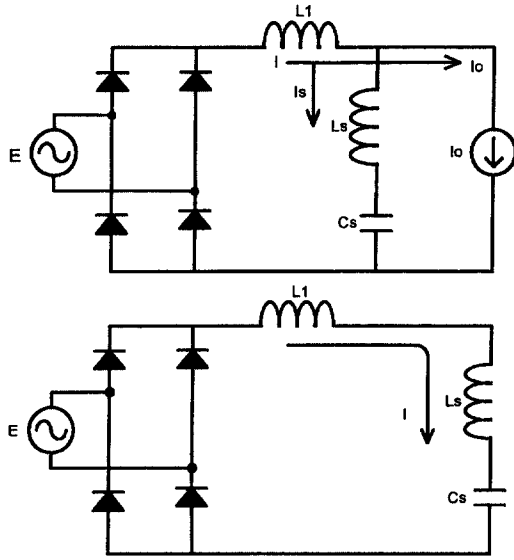


그림 3. 동작 모드 분석
 (a) 스위치 턴-온시 (b) 스위치 턴-오프시
 Fig. 3. Operation Mode analysis.

이에따라 어드미턴스 곡선을 구하면 그림 4(a)와 같다.

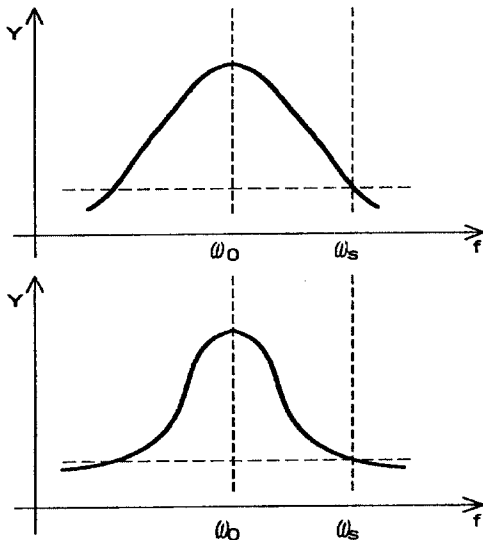


그림 4. 어드미턴스 곡선
 Fig. 4. Admittance curve.

그림 3(b)는 스위치가 오프 되었을 경우로써, 그림 3(a)의 경우와 마찬가지로 L_s, C_s 에 의한 공진각 주파수 ω_0 를 갖게되고, 이때의 임피던스는 식 (4)와 같이 얻어진다.

$$Z_{off} = jX, (X = (\omega_0 L_s + \omega_0 L_1) - \frac{1}{\omega_0 C_s}) \quad (4)$$

그리고 스위칭 주파수는 $\omega_0 < \omega_s$ 이다.

이때 Q_0 는 다음식과 같다.

$$Q_0 = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{(L_s + L_1)}{C_s}} \quad (5)$$

이에따라 어드미턴스 곡선을 구하면 그림 4(b)와 같다.

따라서 LC 회로의 스위치 턴-오프시 동작은 낮은 어드미턴스를 갖게 되므로 평활 커패시터(C_1)의 순간적인 단락 현상을 제거할 수 있다. 또한 스위치의 펄스 폭을 제어할 때 순간적으로 발생하는 스위칭 손실을 감소할 수 있는 효과를 얻을 수 있다. 그리고 커패시터의 용량을 감소시킴으로써 평활 커패시터를 이용한 방식에서의 제어가 어렵다는 단점을 극복할 수 있다.

평활 커패시터와 LC 회로를 첨가한 Buck 컨버터의 시간적 분석은 그림 5와 같다.

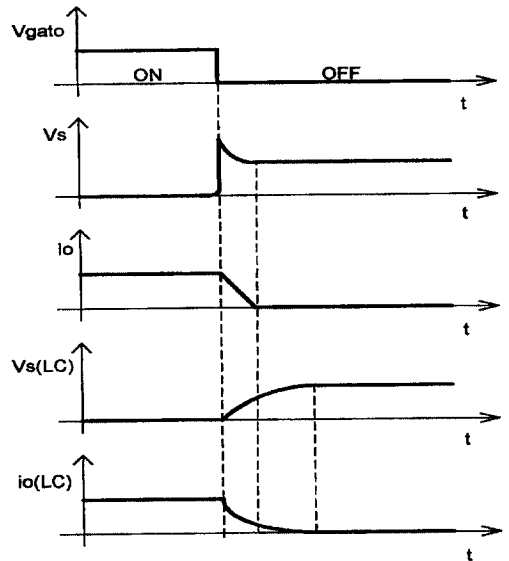


그림 5. 시간 해석
 Fig. 5. Timing chart.

그림 5(b)(c)는 평활 커패시터를 이용한 것으로써, 스위치가 턴-오프 될 때의 스위치 양단에서 순간적인 피크 전압 증가와 급격한 전류 감소 현상이 발생함으로써 스위칭 손실이 커지게 된다. 그러나 그림 5(d)(e)는 LC 회로를 첨가함으로써 그림 5(b)(c)에서와 같은 피크 전압 증가 현상을 없앨수가 있고, 전류의 감소하는 속도(slope)가 완만해지는 결과를 얻을수 있으므로

스위칭 손실을 최소화 할 수 있다.

III. 시뮬레이션

본 논문에서 제시한 두가지 Buck 컨버터에서 스위치가 턴-온, 턴-오프된 경우의 주파수 변화에 대한 동작 특성을 비교 분석할 필요가 있다.

LC 회로를 이용한 개선된 Buck 컨버터와 평활 커패시터를 이용한 Buck 컨버터에서 50 V의 정현파를 일정 진폭, 가변 주파수로 입력하고 각각의 스위치를 턴-온, 턴-오프시를 분할하여 회로의 필터 특성을 시뮬레이션 하였다. 따라서 Q_0 점의 변화에 따른 임피던스가 가변됨을 확인할 수 있었다.

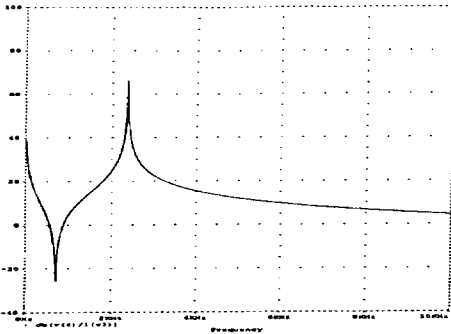


그림 6. 진폭 응답 곡선
(평활 커패시터를 이용한 Buck 컨버터에서 스위치가 턴-온 되었을 경우)
Fig. 6. Amplitude response curve.
(at turn-on time of Buck converter utilizing the smoothing capacitor)

그림 6과 그림 7은 평활 커패시터를 이용한 Buck 컨버터에서 각각 스위치의 턴-온, 턴-오프시의 임피던스 변화를 나타낸 것이다.

스위칭 주파수 1 KHz 에서, 스위치가 턴-온(그림 6)시에는 C_1 양단 임피던스가 5 dB 이나 턴-오프(그림 7)시에는 -23 dB 로 감소한다. 따라서 스위치가 턴-오프될 때, C_1 양단 임피던스는 약 28 dB 감소하게 되므로 전류가 커패시터(C_1)쪽으로 급상승하게 된다. 또한 스위치 양단에 급격한 피크 전압 증가 현상이 발생하게 된다.

그림 8과 그림 9는 평활 커패시터 대신 LC 회로를 이용한 Buck 컨버터에서 각각 스위치의 턴-온, 턴-오프시의 L_s-C_s 양단 임피던스 변화를 나타낸 것이다.

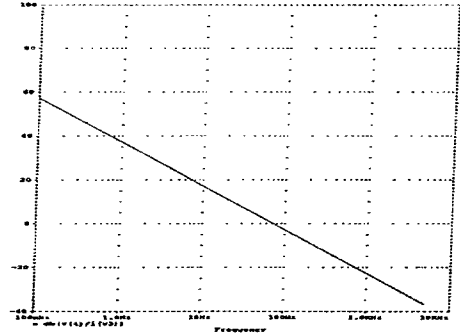


그림 7. 진폭 응답 곡선
(평활 커패시터를 이용한 Buck 컨버터에서 스위치가 턴-오프 되었을 경우)
Fig. 7. Amplitude response curve.
(at turn-off time of Buck converter utilizing the smoothing capacitor)

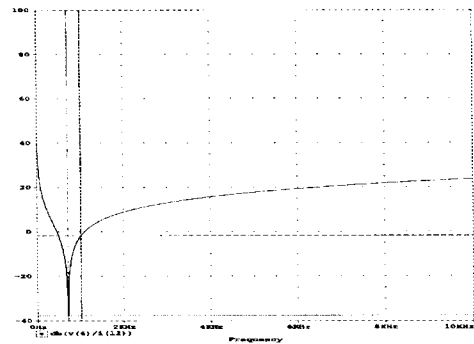


그림 8. 진폭 응답 곡선
(LC 회로를 이용한 Buck 컨버터에서 스위치가 턴-온 되었을 경우)
Fig. 8. Amplitude response curve.
(at turn-on time of Buck converter utilizing the LC circuit)

스위칭 주파수 1 KHz 에서, 스위치가 턴-온(그림 8)시에는 L_s-C_s 양단 임피던스가 -1.69 dB 이었으나 턴-오프(그림 9)시에는 4.667 dB 로 증가하였다. 따라서 스위치가 턴-오프될 때, L_s-C_s 양단 임피던스는 약 6.3 dB 증가하게 되므로 L_s, C_s 쪽으로 흐르는 전류 크기가 완만하게 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 스위치 양단의 급격한 피크 전압 증가 현상도 제거 할 수 있으므로 스위칭 손실을 줄일수 있었다.

그림 10은 LC 회로를 이용한 Buck 컨버터에서 스위치에 흐르는 전류를 시뮬레이션한 파형이고, 그림 11 은 평활 커패시터만을 사용한 전류 파형이다.

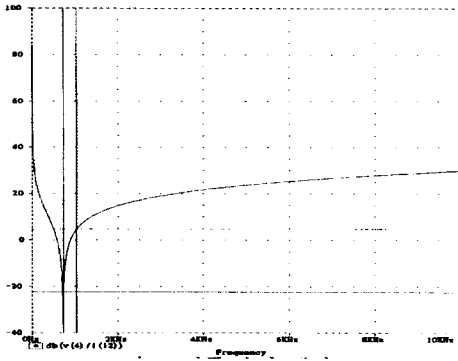


그림 9. 진폭 응답 곡선
(LC 회로를 이용한 Buck 컨버터에서 스위치가 턴-오프 되었을 경우)
Fig. 9. Amplitude response curve.
(at turn-off time of Buck converter utilizing the LC circuit)

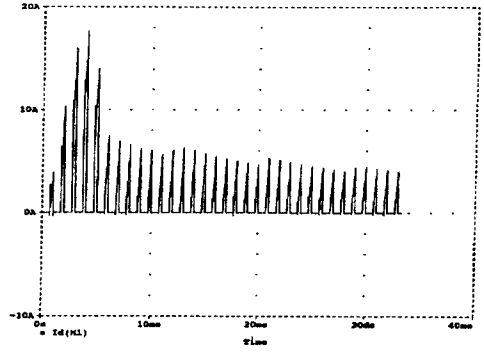


그림 11. 전류 파형
(평활 커패시터를 이용한 Buck 컨버터)
Fig. 11. Current waveform.
(at the Buck converter utilizing the the smoothing capacitor)

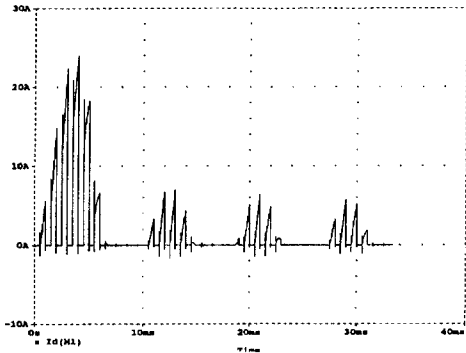


그림 10. 전류 파형
(LC 회로를 이용한 Buck 컨버터)
Fig. 10. Current waveform.
(at the Buck converter utilizing the LC circuit)

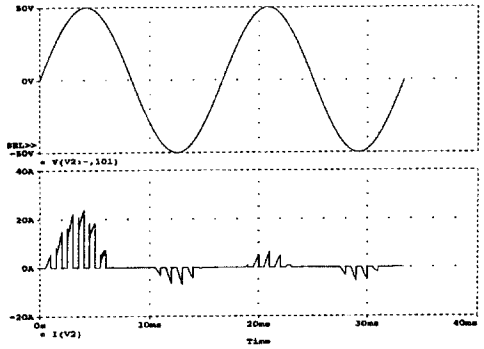


그림 12. 입력 선 전압/전류 파형
(LC 회로를 이용한 Buck 컨버터)
Fig. 12. Input line voltage/current waveform.
(at the Buck converter utilizing the LC circuit)

그림 12와 그림 13은 각각 LC 직렬 회로와 평활 커패시터를 이용한 입력 선 전압/전류 파형으로써 이에 따른 역률(PF)을 구하면 다음과 같다.

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_i^2)}} DPF \quad (DPF = \cos \phi_1) \quad (6)$$

그림 12에서는 $THD = 0.62$, $\phi_1 = -0.989^\circ$ 이므로 $PF = 0.85$ 를 얻었다. 그러나 그림 13에서는 $THD = 1.68$, $\phi_1 = 10.61^\circ$ 이므로 $PF = 0.52$ 를 얻었다. 따라서 LC 회로를 이용한 Buck 컨버터가 평활 커패시터를 이용한 Buck 컨버터 보다 전력 이용률이 좋다는 것을 알 수 있었다.

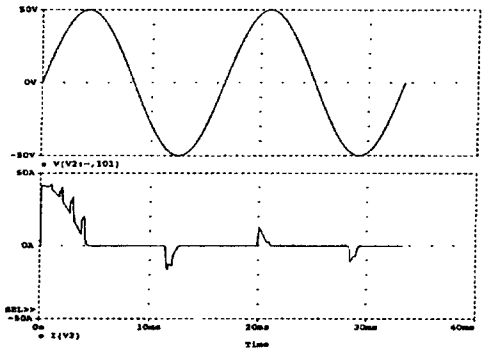


그림 13. 입력 선 전압/전류 파형
(평활 커패시터를 이용한 Buck 컨버터)
Fig. 13. Input line voltage/current waveform.
(at the Buck converter utilizing the the smoothing capacitor)

IV. 실험 및 고찰

본 논문에서 제시한 LC 회로를 이용한 Buck 컨버터와 평활 커패시터를 이용한 Buck 컨버터를 각각 전력용 스위칭 소자인 MOS-FET와 병렬로 구성하고 이것들을 부하 저항 $R_L=100\Omega$ 에서 비교 실험하였다. 또한 그림 2에서 제시한 Buck 컨버터의 회로 정수는 $L_1=0.05\mu\text{H}$, $L_s=0.01\text{mH}$, $C_s=1\mu\text{F}$ 로 하였다.

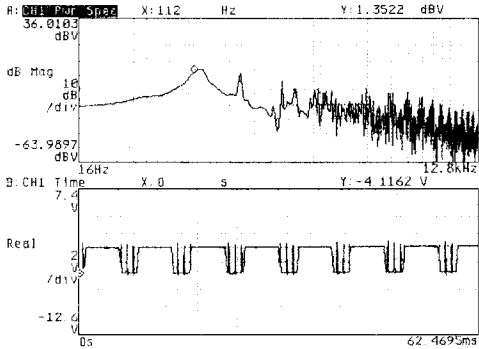


그림 14. 개선된 Buck 컨버터의 선 전류 스펙트럼과 전류파형
 Fig. 14. Line current spectrum and current waveform of the improved Buck converter.

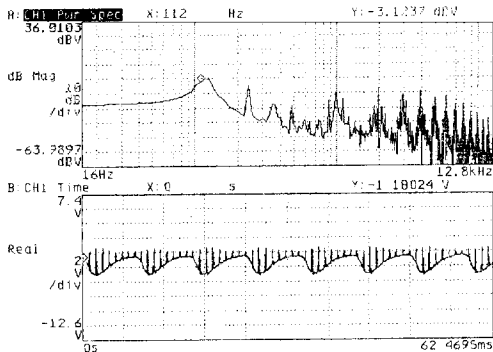


그림 15. 평활 커패시터를 이용한 Buck 컨버터의 선 전류 스펙트럼과 전류파형
 Fig. 15. Line current spectrum and current waveform of the Buck converter using smoothing capacitor.

그림 14의 위(top)와 같은 전류 스펙트럼은 입력된 상용 전원을 전파 브릿지 정류 회로를 통하여 DC 전원으로 정류하고, LC 회로와 MOS-FET 드레인 단자 사이의 전류를 Current Transformer(CT) 로 측정된 결과로써 전파된 전류 스펙트럼은 1차 고조파인 112 Hz에서 1.3522 dB 이다. 그리고 그림 14의 아래

(bottom)는 같은 방법으로 전류 파형을 측정된 결과이다. 이때 시뮬레이션에서 분석한 결과와 실험에서의 결과 파형을 비교하여 동일한 결과를 얻을수 있었다. 그리고 그림 15 는 LC 회로 대신에 2200 μF 의 평활 커패시터를 이용하여 그림 14와 같은 방법으로 측정된 결과를 나타낸 것으로 이때의 전류 스펙트럼은 1차 고조파인 112 Hz에서 3.1237 dB 가 얻어짐을 확인할 수 있었다. 따라서 그림 14와 그림 15는 스위칭 주파수를 1 KHz 로 하여 실험한 것으로써 두 결과 모두 2차 고조파, 4차 고조파가 발생하지만 3차 고조파는 평활 커패시터를 이용한 Buck 컨버터에서만 발생함을 확인할 수 있었다. 그리고 전력 이용률 면에서 볼 때, 동일 입력, 동일 제어 상태에서 LC 회로를 이용한 Buck 컨버터의 경우가 평활 커패시터를 이용한 Buck 컨버터 보다 전류 이용률이 4.48 dB 더 높은 것을 확인할 수 있었다.

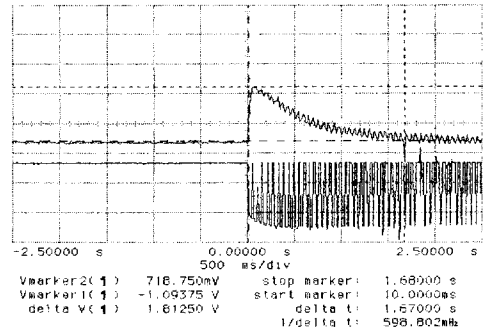


그림 16. 개선된 Buck 컨버터의 초기 전압 및 전류파형
 Fig. 16. Initial voltage and current waveform of the improved Buck converter.

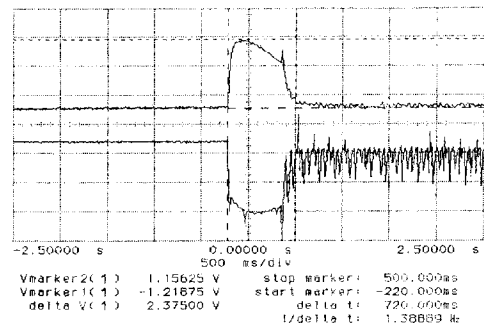


그림 17. 평활 커패시터를 이용한 Buck컨버터의 초기 전압 및 전류 파형
 Fig. 17. Initial voltage and current waveform of the Buck converter using smoothing capacitor.

그림 16과 그림 17은 LC 회로를 이용한 Buck 컨버터와 평활 커패시터를 이용한 Buck 컨버터의 초기 기동시, 출력 전압-전류의 변화율을 측정할 파형이다. 그림 16에서 초기 기동시 출력 전압 변화율의 최대 값은 1.812 V, 정상 상태에 도달하는 시간은 1.67 sec 이었다. 그리고 전류는 거의 일정한 크기를 유지하였다. 그러나 그림 17은 정상 상태에 도달하는 시간은 720 msec 이었지만, 출력 전압 변화율의 최대값이 2.375 V 이고, 전류의 변화가 상당히 크게 나타났다. 따라서 그림 16의 최대 출력 전압 변화율은 그림 17의 최대 출력 전압 변화율 보다 1.32 배 낮은 과도 응답을 나타냈으며, 평활 커패시터를 이용한 Buck 컨버터에서의 전류는 순간적으로 상당히 높은 피크 전류가 흐르는 것을 확인할 수 있었다.

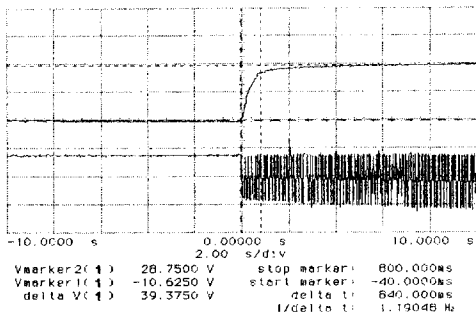


그림 18. 개선된 Buck 컨버터의 전압과 전류 스텝응답
Fig. 18. Voltage and current step response of the improved Buck Converter.

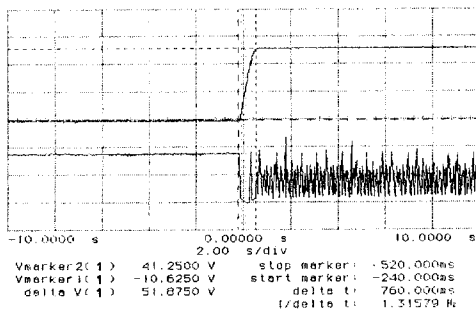


그림 19. 평활 커패시터를 이용한 Buck 컨버터의 전압과 전류 스텝응답
Fig. 19. Voltage and current step response of the Buck converter using smoothing capacitor.

그림 18과 그림 19는 컨버터의 펄스 폭을 같게하고

제시한 컨버터들의 초기 구동시의 전압과 전류의 변화를 보인 것이다. LC 회로를 이용한 그림 18에서의 전류는 일정한 크기를 유지하지만, 평활 커패시터를 이용한 그림 19에서는 일정하지 않은 크기의 전류를 갖는다. 또한 평활 커패시터에 의하여 출력 전압이 비례적으로 제어되지 못하는 것을 확인할 수 있었다.

V. 결론

본 논문에서는 LC 회로를 전원 입력단에 적용하여 평활 커패시터를 이용한 Buck 컨버터에서 스위치가 오프되었을 경우에 발생하는 스위칭 손실을 감소시킴으로써 전력을 효율적으로 개선할 수 있는 Buck 컨버터를 제시하였다. 그리고 이때의 역률(PF)은 0.85 를 얻을 수 있었다. 또한 평활 커패시터를 이용한 Buck 컨버터와 비교, 분석하였고 그 결과는 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다.

개선된 Buck 컨버터의 전류는 기존의 평활 커패시터를 이용한 Buck 컨버터 보다 변화율이 적으므로 거의 일정한 값을 유지할 수 있었고, 고조파 함유률이 감소되어 전류 이용률은 4.48 dB 높아졌다. 또한 스텝 응답 특성에 대한 실험을 비교한 결과, 개선된 Buck 컨버터가 기존의 Buck 컨버터가 보다 1.32 배 낮은 출력 전압 변화율을 갖기 때문에 과도 응답 특성이 향상됨을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] Marvin J. Fisher, "Power electronics", Kent, 1991.
- [2] Abraham. I. Pressman, "Switching Power supply Design", McGraw Hill, 1991.
- [3] John G. Kassakian, "Principles of power Electronics", Massachusetts Institute of Technology, 1992.
- [4] Moham, underand, Robbins, "Power Electronics", John Wiley & Son, 1995.
- [5] Kalyan K. Sen, Alexander E. Emanuel, "Unity power factor single phase power conditioning", IEEE-PESC, 1987, pp. 516-524.
- [6] Isao Takahashi, Ricardo Y. Igarashi, "High power factor switching regulator with no

rush current”, IEEE-IAS, 1992, pp 673-680.

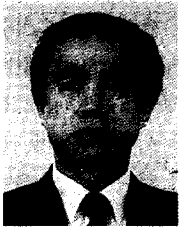
[7] Muhammad H, Rashid, “Spice for power electronics and electric power”, Prentice Hall, 1993.

[8] Deepak M. Divan, G.Venkataramanan, C.Chen, “A Unit Power Factor Forward Converter”, IEEE-IAS, 1992. pp. 666-672.

[9] Carlos Alberto Canesin, Ivo Barbi, “A unity power factor multiple isolated outputs switching mode power supply using a single switch”, IEEE-APEC, 1991, pp. 430-436.

[10] Y.Hatanaka, M.Yamagami, and M.Nakao-ka, “High frequency inverter and DC-DC converter with ZCS • ZVS mode”, IECON, 1991, pp. 237-242.

저 자 소 개



林 承 河(正會員)
 第 31卷 B編 第 12 號 參照
 현재 부천전문대학 전자과 교수



司 空 石 鎮(正會員)
 1951년 3월 23일생. 1976년 2월 고려대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1981년 2월 고려대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1985년 2월 고려대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1976년 ~ 1980년 Motorola 연구원. 1990년 ~ 1991년 스위스 E.T.H. 초빙 교수. 1982년 ~ 현재 국민대학교 전자공학과 교수