

박막 인덕터를 이용한 ZVS-CV 컨버터에 관한 연구

임상언*, 김영재*, 김희준*, 김형준**
 *한양대학교 전기공학과, **홍익대학교 금속재료공학과

A Study on the ZVS-CV Converter Using Thin-Film Inductor

Im Sang -Un*, Kim Young-Jae*, Kim Hee-Jun*, Kim Hyung-June**

*Dept.of Hanyang Univ. Electrical Eng., **Hong-ik Univ Dept of Metallurgy and Material Science

Abstract - Buck converter is considered to be one of the most widely used DC-DC converters due to its simple structure and high reliable performance. However, when it be combined with thin-film inductor, its own low inductance requires higher switching frequency in order to maintain optimum output ripple voltage and thus gives rise to extra switching losses. In view to overcoming such a technical inconvenience, soft switching fashion is suggested such as zero-voltage-switching of which an well known example is a Zero-Voltage-Switching clamp voltage(ZVS-CV) converter for which low inductance is imperatively required for ZVS operation.

In order to support our suggestion, a 1W of ZVS-CV buck converter ($V_o=3.3V$, $I_{omax}=0.3A$, $f_s=1.2MHz$) is built by use of thin-film inductor ,and then tested for comparing the measured efficiency between ours and conventional one. As the our results, the efficiency is improved about 2% at full load by the application of our concept.

1. 서 론

DC-DC변환기 및 DC-AC변환기등 반도체 스위치를 이용한 고효율 전력 변환기에 있어서 소형, 경량화를 위한 기술로 여러 가지 효과적인 방법들이 연구되어 왔다. 그러나 현대의 정보통신기술의 괄목할만한 발달로 더욱 소형화된 전원장치에 대한 요구가 높아지고 있으나 아직 전원장치의 연구가 이 요구에는 미치지 못하고 있다. 이에 세계의 많은 엔지니어들에 의해 전원장치의 소형화에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으며, 그 중에 전력용 박막 인덕터의 연구와 이를 이용한 전력변환기의 개발은 현재 널리 사용되고 있는 PCS폰 등 정보통신용 기기 등의 전원장치의 소형화에 큰 기여를 할 것이 기대된다. 현재 이러한 박막 인덕터를 이용한 전력변환기의 개발은 상당한 단계에까지 도달하고 있으나 박막인덕터 자체의 큰 손실로 인하여 박막 인덕터를 적용한 고효율 전력변환기의 개발이 어려운 실정에 있다.

본 논문에서는 이러한 박막 인덕터의 구조와 주파수에 따르는 특성 및 Impedance 특성을 분석하고 여기에서 제시한 박막 인덕터를 적용하여 스위칭 주파수 1.2MHz, 입력전압 4.5V, 출력전압 3.3V, 출력전류 0.3A인 1W급 컨버터를 제작하였고, 그에 따른 특성에 대해 논하였다. 또한 박막 인덕터의 높은 코일저항으로 야기되는 컨버터의 효율저하를 보상할 수 있는 전력변환기로서 ZVS-CV Buck 컨버터를 적용하고 있다. 그 결과로서 일반 Buck 컨버터와 비교해서 더 향상된 효율을 가짐을 알 수 있었으며, 최대효율이 80% 이상 나타났다.

2. 본 론

2.1.1 박막 인덕터의 구조 및 특징

박막 인덕터의 구조는 그림1,그림2에서와 같이 유리 면 위에 Magnetic layer를 형성시키고 그 위에 Conductor를 적층 시킨 다음 그 위에 다시 Magnetic layer를 적층 시킨 나선형 코일 형태로 되어 있다. 여기서 Magnetic layer(코어)의 재질로는 FeTaN을 이용하고 있고, Conductor(권선)의 재질로는 Cu를 이용하고 있다. 한편 고주파에 따른 eddy current 손실은 증가하는데, 이는 Magnetic layer의 위 와 아래에 존재하는 자계에 의해서 뿐만 아니라, plane에 직교로 존재하는 자계에 의해서도 기인하여 증가하게 된다. 이러한 손실의 증가를 줄이고 인덕터의 절연을 위하여 각각의 Magnetic layer와 Conductor사이에 SiO₂를 에칭 하였으며, 권선을 rotation 자화 공정 방식을 도입한 나선형 박막 인덕터를 제작하였다.

Magnetic layer의 두께는 $2\pm 0.2\mu m$, Conductor의 두께는 $20\pm 1.2\mu m$, 그리고 절연층의 두께는 $2\pm 0.2\mu m$ 로 설계하였으며, 코일의 폭은 $260\mu m$, 코일간의 간격은 $70\mu m$ 이며, pad의 폭은 $650\mu m$ 로 설계되었다. 또한 박막 인덕터의 권수는 10 turns으로 하였다. 박막 인덕터 전체의 크기는 가로 7.8mm, 세로 10mm이며, 총 두께는 $28\pm 1.4\mu m$ 이다.

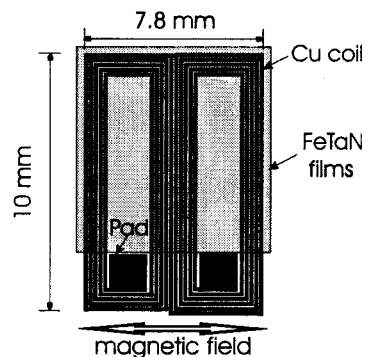


그림 1 박막 인덕터의 평면구조

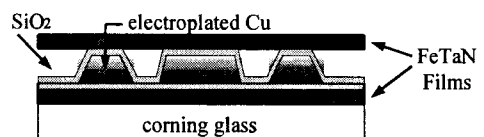


그림 2 박막 인덕터의 Cross section 구조

2.1.2 박막 인덕터의 주파수 특성

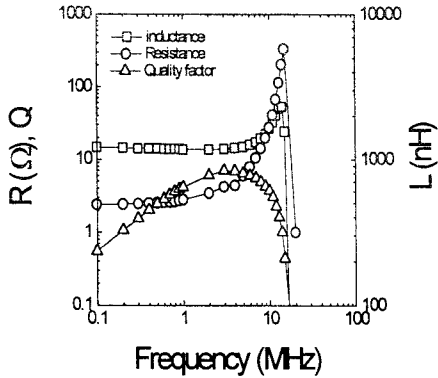


그림 3 박막 인덕터의 주파수 특성(Q,R,L)

주파수 변화에 대한 인덕턴스(L)와 등가저항(R)과의 관계, 그리고 주파수 변화에 대한 인덕턴스(L)와 Quality Factor(Q)의 관계를 측정하여 그림3에 나타내었다. 그림3의 결과에 의하면 주파수가 5MHz 까지 박막 인덕터의 인덕턴스(L)와 저항값(R)은 거의 변화가 없음을 볼수 있다.

측정된 대표적인 값으로는 1MHz의 주파수에서 $L = 1.19 \mu\text{H}$, $R = 2.134 \Omega$ 이다. 또한 그림3의 결과를 보면 주파수 1MHz 일 때 Quality Factor의 값은 약 2.34로 측정되었으며 Q-Factor의 최대치는 5MHz에서 8.72의 값을 나타내었다.

2.2 박막 인덕터를 이용한 고주파 DC-DC컨버터

DC-DC 전력변환기 등 반도체 스위치를 이용한 고효율 전력변환기에 있어서 소형·경량화를 위한 기술로써 가장 효과적인 방법은 스위칭 주파수를 고주파화하여 수동소자인 인덕터 및 커패시터를 소형화하는 것이다. 그러나 주파수를 고주파화 하는 경우, 그로 인한 스위칭 손실이 커지게 되어 효율저하의 한 원인이 된다.

스위칭 손실은 스위치의 ON/OFF시 전압 전류 파형의 천이 구간에서 발생한다. 이 손실은 주파수에 비례하여 증가하게 되므로 DC-DC 컨버터의 동작주파수에는 한계가 존재하게 된다. 따라서 DC-DC 컨버터의 소형 경량화와 관련하여 주파수 한계를 뛰어 넘을 수 있는 스위칭 방법이 요구되는데 그중 하나는 스위치의 전압이나 전류를 공진 시킴으로써 스위칭 손실을 제거하는 방법으로 공진형 스위칭 방식이 있고, 다른 한가지 방법은 천이 구간만 공진 시킴으로써 스위칭 손실을 영으로 만드는 영전압 스위칭 방식이 있다. 그러나 공진형 스위칭방식의 경우는 공진에 의해 전압 혹은 전류의 높은 스트레스가 초래되므로 박막 인덕터를 손상시킬 위험성이 있고, 또한 전도 손실의 증가와 공진회로가 첨가되므로 회로 구성이 복잡하다는 단점 때문에 박막 인덕터를 이용한 고주파 DC-DC 컨버터에는 적합하지 못한 방식이라 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 앞서 논의된 사항을 고려하여 박막 인덕터를 이용한 DC-DC 컨버터의 응용에 적합한 스위칭 방식으로 기존의 PWM 스위칭방식과 동등한 정도의 전압 및 전류 스트레스를 가지며, 또한 공진형 컨버터의 장점인 소프트 스위칭의 특징을 갖고 회로가 간단한 영전압 스위칭(ZVS-CV) Buck 컨버터를 적용하였다. 또한 컨버터를 구동할 수 있는 최적의 스위칭 주파수는 앞서 측정된 박막 인덕터의 특성을 충분히 고려하여 높은 Quality Factor값을 갖고, 작은 인덕터의 작

은 등가저항과, 식(1)의 조건과 같이 중부하 시에도 소프트 스위칭이 가능한 인덕턴스 값을 갖는 지점의 주파수로써 1.2MHz로 선택하였다.

$$L \leq \frac{DT_s(V_i - V_o)}{2I_{omax}} \quad (1)$$

2.2.1 박막 인덕터를 이용한 ZVS-CV Buck 컨버터

그림4에 박막 인덕터를 이용한 ZVS-CV Buck 컨버터의 회로도를 나타내었다. 기존의 일반 Buck 컨버터와는 달리 보조스위치 SW2가 첨가되고 있으며 각각의 스위치의 기생성분인 C_{oss1} 및 C_{oss2} 의 출력 Capacitor와 박막 인덕터 사이의 공진을 이용하여 전류가 역 병렬로 연결된 MOSFET의 바디 다이오드를 통하여 흐를 때 각 스위치를 온 시킴으로 소프트 스위칭 동작을 수행하고 있다. 그림5의 파형은 ZVS-CV Buck 컨버터의 이론적 파형을, 그림6은 각 시구간에 대한 이 컨버터의 동작회로를 나타낸다. 각 시구간에 대한 이 컨버터의 동작을 살펴보면 다음과 같다.

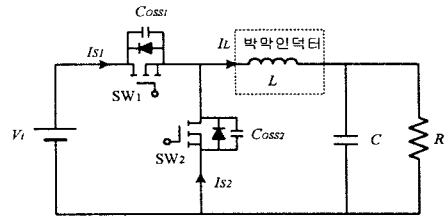


그림4 박막 인덕터를 이용한 ZVS-CV Buck 컨버터

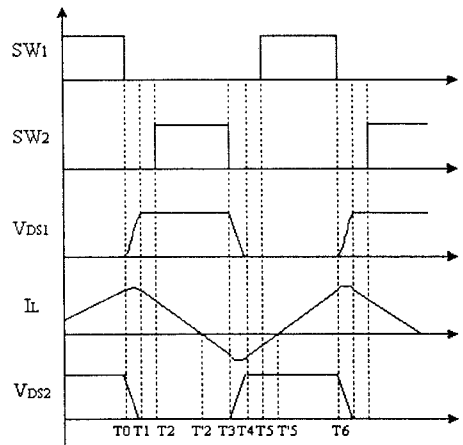


그림 5 ZVS-CV Buck 컨버터의 동작파형

- 1) $\sim T_0$
SW1가 ON인 상태이므로 주스위치의 채널을 통하여 전류가 흐르고 인덕터에 에너지가 충전된다.
- 2) $T_0 \sim T_1$:
다음으로 주스위치 SW1이 OFF되면 주스위치의 기생성분인 출력 캐패시터 C_{oss1} 에는 충전되고 부스위치 SW2의 기생성분인 출력 캐패시터 C_{oss2} 는 방전된다.

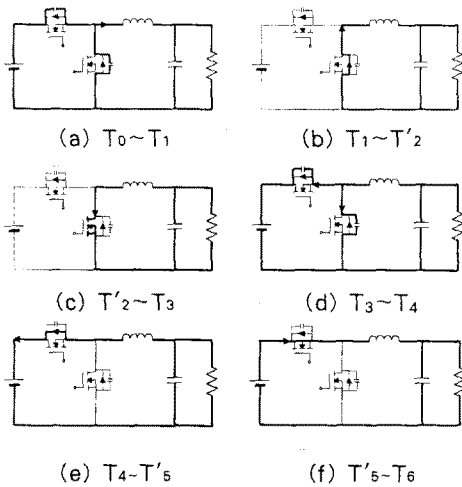


그림6 ZVS-CV Buck 컨버터의 이론적 동작

이 구간은 각 스위치의 출력 캐패시터 성분과 인덕터의 공진전압이 이루어지고 각 스위치의 충방전은 LC 공진으로 충방전을 한다.

3) $T_1 \sim T'_2$

각 스위치의 기생성분인 출력 캐패시터 C_{oss1} , C_{oss2} 에 충·방전이 완료되면 C_{oss1} 에는 V_i 만큼의 전압이 충전되고 C_{oss2} 는 전압이 영으로 방전되어 에너지는 영이 된다. 반면에 인덕터의 에너지는 $\frac{1}{2} L i_L^2$ 이 되고, 이것은 SW2의 출력 캐패시터 C_{oss2} 의 에너지보다 크므로 SW2의 바디 다이오드가 턴온되기 위한 조건이 형성된다. 그리하여 인덕터의 전류가 SW2의 바디 다이오드를 통하여 환류 하는 동안 SW2를 온 시키면 SW2의 드레인-소스 전압이 영이므로 영전압 턴온이 된다. 인덕터에 축적된 에너지는 영이 될때까지 환류 다이오드 역할을 하는 SW2의 바디 다이오드를 통해서 전류가 흐른다.

4) $T'_2 \sim T_3$

인덕터의 Volt·Sec의 법칙에 따라 역으로 충전된 에너지에 의해 SW2의 채널을 통하여 인덕터의 전류가 역 방향으로 흐르게된다.

5) $T_3 \sim T_4$

이때 다시 SW2를 오프 시키면 SW2의 출력 캐패시터에 충전이 시작되고 SW1의 출력 캐패시터는 방전을 시작한다. 이때는 역 전류가 SW2의 출력 캐패시터 C_{oss2} 을 충전하기 위해 흐른다. 이때의 인덕터에 저장되는 에너지는 각 스위치의 에너지보다 반드시 커야한다. 그렇지 않으면 각 스위치의 출력 캐패시터의 에너지가 충·방전을 완전히 하지 못하고 결국 바디 다이오드를 온 시키지 못하여 역 전류는 흐르지 못하고 영전압 스위칭을 이룰 수 없게된다.

6) $T_4 \sim T'_5$

SW1의 출력 캐패시터 C_{oss1} 에 방전이 완료되면 C_{oss1} 의 에너지는 영이 된다. 또한 인덕터에 저장된 에너지가 SW2의 출력 캐패시터 C_{oss2} 에 저장된 에너지보다 크므로 계속 역 전류가 흐르게 되며, C_{oss2} 에 충전된전압은 완전히 V_i 가 된다. 한편 인덕터에는

$\frac{1}{2} L i_L^2$ 의 유도성 에너지가 존재하므로 SW1의 바디 다이오드는 온이 될 조건에 놓이게 된다. 그리하여, SW1의 바디 다이오드는 온이 되고 이 다이오드를 통하여 계속 역 전류가 흐른다. 이때 SW1을 온 시키면 영전압 턴온이 된다. 그러나 인덕터의 에너지가 다시 영으로 될 때까지 전류는 SW1의 채널을 통하여 흐르지 않고, 계속 SW1의 바디다이오드를 통해서만 전류가 흐른다.

7) $T'_5 \sim T_6$

인덕터의 에너지가 영으로 방전을 완료하면 SW1의 바디 다이오드는 오프가 되고 이때 SW1의 채널을 통하여 전류가 흐르고 다시 인덕터에 충전이 시작된다.

2.2.2 박막 인덕터를 이용한 ZVS-CV의 실험결과

ZVS-CV Buck컨버터를 실험한 결과 다음과 같이 영전압 스위칭이 이루어지는 것을 알 수 있다.

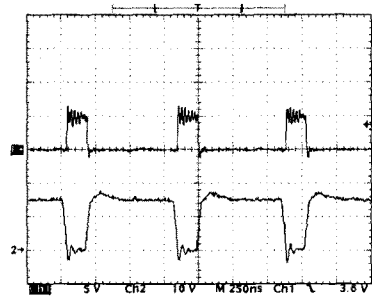


그림 7 Full 부하시 주스위치의 전압(ch1)

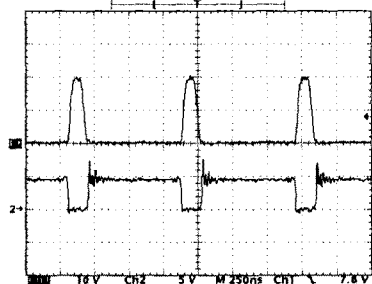


그림 8 Full 부하시 부스위치의 전압(ch2)

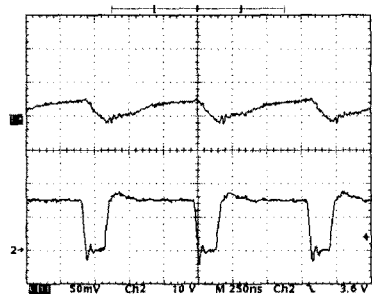


그림 9 Full 부하시 인덕터 전류(ch1)

3. 결 론

박막 인덕터를 이용하여 고효율, 고주파수대의 ZVS-CV 컨버터에 대한 연구 결과는 다음과 같다.

첫째, 고주파에서 가장 적합한 임피던스 특성을 갖는 본 연구에서 제시된 박막 인덕터의 특성을 파악하기 위해 주파수에 따른 박막 인덕터의 임피던스를 분석한 결과로서 1.2 MHz에서 컨버터의 설계에 적합한 인덕턴스와 Quality Factor(Q)을 가짐을 알 수 있었다.

둘째, 위 결과를 토대로 박막 인덕터를 실제 컨버터에 적용하였고, 컨버터의 효율을 높이기 위해 ZVS-CV 컨버터를 설계, 실험을 통하여 분석하였으며 이를 일반 하드 스위칭 Buck 컨버터와 비교하여 효율이 2%정도 증가함을 볼 수 있었다. 이것은 하드 스위칭 Buck 컨버터보다 영전압 스위칭을 적용하였을 때 스위칭 손실이 감소하여 효율이 상승함을 증명하는 것이다.

본 연구를 통해본 결과 앞으로 박막 인덕터를 이용한 고효율 전력변환기를 실용화하기 위해서는 스위칭 손실이 최소가 되도록 설계를 해야하며 이에 대한 하나의 방식으로서 ZVS-CV 컨버터가 적당한 방식임을 알 수 있었다. 또한 박막인덕터에서 전도손실을 유발하는 기생 저항 성분이 상당히 크다는 것을 알 수 있었다. 이것은 컨버터의 효율저하에 크게 작용하므로 이에 대한 연구가 선행되어야 하며 이 기생저항의 특성이 개선된다면 효율이 상승 할 것이라 기대된다.

본 논문은 1998년 기초전력공학기술연구소의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

(참 고 문 헌)

- [1] Toshiro Sato, "A Magnetic Thin Film Inductor and its Application to a MHz Switching dc-dc Converter", IEEE Transaction on Magnetics, 2, 1994
- [2] M. Yamaguchi, H.Okuyama and K. I. Arai, "Characteristic of Magnetic Thin-Film Inductors at Large Magnetic Field", IEEE Transaction on Magnetics, 6, 1995
- [3] 김희준, "소프트 스위칭 방식에 의한 스위치보드 파워 서플라이", 대한전기학회지2, 1997

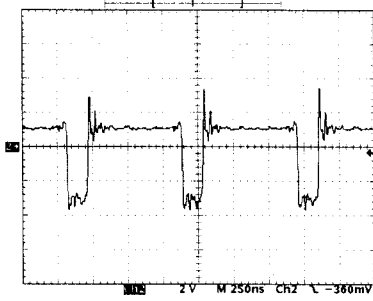


그림 10 Full 부하시 인덕터 전압

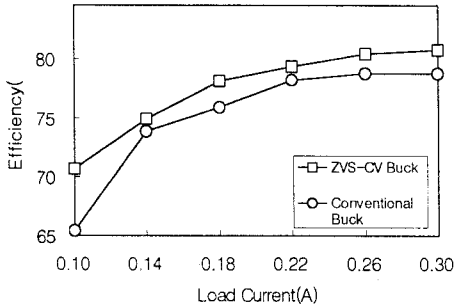


그림 11 컨버터의 효율 비교

또한 일반 Buck 컨버터와 ZVS-CV 와 효율을 비교한 것을 그림 11에서 나타내었다. 그림11에서 알 수 있듯이 일반 컨버터의 효율보다 약 2%정도 향상된 효율폭 선을 볼 수 있다.