

LED 구동 응용을 위한 고효율 경계모드 탭인덕터 부스트 컨버터의 분석과 설계

강정일*, 한상규**, 한종희*
삼성전자*, 국민대학교**

Analysis and Design of High-efficiency Boundary Conduction Mode Tapped-Inductor Boost Converter for LED Driver Applications

Jeong il Kang*, Sang Kyoo Han**, Jonghee Han*
Samsung Electronics*, Kookmin University**

ABSTRACT

본 논문에서는 모바일 기기 등에 사용되는 소형 디스플레이를 위한 고효율 경계모드 탭인덕터 부스트 LED 구동회로를 분석하여 장점을 밝히고 최적의 설계기준을 제시한다.

1. Introduction

승압형 컨버터는 입력 측의 높은 전류로 인한 손실을 줄이기 위해 주로 전류연속 모드로 동작을 시키는데, 모바일 기기의 LED 백라이트 등과 같은 소용량 LED 구동 응용에 있어서는 이와 같은 문제가 심각하지 않기 때문에 다이오드 역회복 문제가 없고, 우반평면 영점이 없으며, 기울기 보상이 필요 없고, 특정 조건에서 영전압 스위칭이 이루어지는 등의 장점이 있는 경계모드의 동작도 매우 바람직하다.^[1]

본 논문에서는 경계모드 탭인덕터 부스트 회로를 분석하여 그 특징 및 제안된 응용에 있어서의 장점을 알아보고, 최적의 설계기준을 제시하여 55V/44mA 사양의 14인치 LED 백라이트 구동 응용을 통해 실험적으로 검증한다.

2. Analysis of BCM TIB Converter

그림 1과 2에 탭인덕터 부스트(이하 TIB) 컨버터의 회로와 경계모드(이하 BCM) 동작 시의 주요 정상상태 파형을 보였다. MOSFET M_1 은 스위칭 주파수 f 와 듀티 D 로 동작하며, N_p 와 N_s 는 각각 탭인덕터의 1차 및 2차 턴 수를 나타내며, 전개의 편의 상 $k=1+N_s/N_p$ 라고 한다. 그리고, C_{ds} 와 C_j 는 각각 M_1 과 다이오드 D_1 의 턴 오프 기생용량을 나타내고, L 은 탭인덕터의 1차측 자화 인덕턴스를 나타낸다. 또한, i_p 와 i_s 는 각각 탭인덕터의 1차와 2차 권선의 전류를 나타내고, i_d 와 i_c 는 각각 M_1 과 출력 커패시터 C_o 에 흐르는 전류를 나타낸다. 회로의 분석에 있어 L 이외의 모든 기생성분은 무시하며, 입력과 출력전압은 각각 V_i 와 V_o 로, 부하전류는 I_o 로 일정하다고 가정한다.

인덕터 양단의 전압 시간 평형조건으로부터 얻어지는 경계모드 TIB의 입력력 전압비는 전류연속 모드 TIB의 경우와 동일하며, i_s 의 한 주기 평균은 I_o 와 같음을 이용하여 I_{pk} 를 구할 수 있고, 구해진 I_{pk} 와 그림 2의 파형을 이용하면 컨버터 설계 시 참조를 위한 각 주요 전류의 실효치를 구할 수 있다.

표 1에 BCM TIB 컨버터의 주요 정상상태 특성에 관한 수식을 정리하였으며, 그림 3에 몇 가지 $N=N_s/N_p$ 값에 대한 D ,

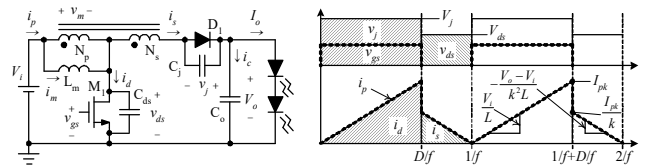


그림 1 탭인덕터 부스트 컨버터와 주요 동작 파형
Fig. 1 Tapped-inductor boost converter and its key waveforms

V_{ds} , I_{pk} , V_j 및 i_s , i_p , i_d , i_c 의 RMS 값을 V_i 및 I_o 에 대해 정규화하여 V_o/V_i 의 함수로 도식하였다. 여기서, LED 구동회로는 온도, lot 간 산포, 고장성 및 비교장성 임피던스 변화 등에 의해 전압이 변동하는 LED에 정전류를 공급해야 하므로 이와 같이 V_o/V_i 의 함수로 표현함이 의미가 있다. 그림 3으로부터 D , V_{ds} , i_s , i_c 의 경우 탭인덕터의 턴 비가 증가할수록 유리하며, 반대로 I_{pk} , V_j , i_p , i_d 의 경우 탭인덕터의 턴 비가 감소할수록 유리함을 알 수 있다. 또한, N 의 증가에 따른 D , V_{ds} , i_s , i_c 의 개선은 포화되는 경향이 있으나, 반면, I_{pk} , V_j , i_p , i_d 의 경우 N 이 증가함에 따라 거의 일정한 폭으로 꾸준히 증가함을 알 수 있다. 따라서, BCM TIB 컨버터는 N 이 작을수록 보다 효과적으로 설계될 수 있어 통상적으로 알려진 바와 달리 반드시 높은 승압비의 응용이 아니더라도 그 유용성을 찾을 수 있음을 알 수 있다. 한편, 표 1에서 I_{pk} 는 M 의 턴 온 시간동안의 인덕터 전류의 증분과 같음을 이용하여 스위칭 주파수 f 를 L 과 I_o 의 함수로 아래와 같이 구할 수 있다.

표 1 주요 정상상태 특성
Table 1 Key steady-state characteristics

item	TIB
D	$\frac{V_o/V_i - 1}{V_o/V_i + N}$
I_{pk}	$2I_o(N + V_o/V_i)$
V_{ds}	$V_i \frac{V_o/V_i + N}{k}$
V_j	$V_i(N + V_o/V_i)$
$i_{p,ms}$	$\frac{2I_o}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{1+Dk^2-D}}{1-D}$
$i_{d,ms}$	$\frac{2I_o}{\sqrt{3}} \frac{k\sqrt{D}}{1-D}$
$i_{s,ms}$	$\frac{2I_o}{\sqrt{3}} \frac{1}{\sqrt{1-D}}$
$i_{c,ms}$	$\frac{I_o}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{1+3D}}{\sqrt{1-D}}$

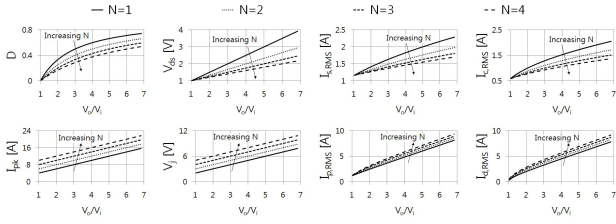


그림 3 승압비 변화에 따른 주요 파라미터 변동 추이
Fig. 3 Trend of key parameters according to V_o/V_i variation

$$f = \frac{V_i^2(V_o - V_i)}{2LI_o\{(N_s/N_p)V_i + V_o\}^2} \quad (1)$$

부하전압 변동에 따른 식 (1)의 변화는 특정 입출력 사양에 대하여 f 를 동일 값으로 고정하여 비교함이 공정하다. $V_i=14V$, $V_o=55V$, $I_o=44mA$, $f=220kHz$ 의 예시 조건에 대해 몇 가지 N 값에 대한 L 값을 구하여, 각 경우에 대한 f 를 V_o 의 함수로 그림 4에 도시하였다. 가정된 사양 근처에서 V_o 의 변동에 대한 f 의 변화는 $N=0$ 인 기존 부스트 방식 대비 $N \neq 0$ 인 TIB의 경우 N 값에 따라 월등히 작음을 보이고 있는데, 이는 출력 전압이 유도적인 정전류 LED 구동에 있어 매우 유용한 특성이다.

3. Design of BCM TIB LED driver

$V_i=14V$, $V_o=55V$, $I_o=44mA$ 사양의 14인치 LED 백라이트에 대해 BCM TIB LED 구동회로의 설계과정을 보인다. BCM 동작의 중요 장점 중의 하나는 특정 조건에서 인덕터와 스위칭 소자의 기생용량과의 공진에 의해 MOSFET의 영전압 스위칭(이하 ZVS)이 가능하다는 점이다. TIB에 있어서 인덕터 전류가 0이 되는 순간 L , C_{ds} , C_j 로 이루어지는 공진회로를 분석하면 아래와 같이 v_{ds} 가 구해진다.

$$v_{ds}(t) = \frac{V_o - V_i}{k} \cos \frac{t}{\sqrt{L(C_{ds} + k^2 C_j)}} + V_i \quad (2)$$

공진 반주기 후 이 식이 음의 값이 되면 M_1 의 바디 다이오드가 도통하면 ZVS가 가능하게 되는데, 이 조건을 정리하면 $D > 0.5$ 와 같다. 스위칭 주파수는 입출력 필터의 크기나 주변 회로와의 간섭을 고려하여 220kHz로 선정하고, N 이 작을수록 효과적인 설계가 가능할 뿐만 아니라 동작 듀티가 높아져 ZVS를 위한 마진의 확보가 용이해지므로 그림 4를 고려하여 적절히 $N=1$ 로 선정하면 $L=87\mu H$, $D=0.59$ 가 구해진다. 그리고, 탭 인덕터 코어의 단면적 A_c 와 공극의 길이 l_g 가 주어졌을 때, $L = \mu_0 A_c N_p^2 / l_g$ 의 관계로부터 N_p 를 구할 수 있고, 창면적을 A_w , 1차와 2차 권선의 턴 당 평균지름을 모두 d_w , 권선의 fill factor를 K_w , 1차와 2차 권선의 단면적을 각각 A_p 와 A_s , 권선의 저항률 ρ 라 하면, 전류가 권선의 단면에 고르게 분포한다는 가정 하에 탭인덕터의 총 도통손실은 아래와 같이 구해진다.

$$P_{conduct} = \pi d_w \rho \{ I_{p,RMS}^2 N_p / A_p + I_{s,RMS}^2 N_s^2 / (K_w A_w - N_p A_p) \} \quad (3)$$

위 식 (3)를 최소로 만드는 A_p 를 표 1의 RMS 전류의 식을 대입하여 아래와 같이 구할 수 있다.

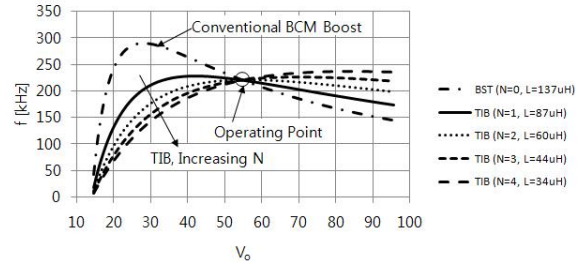


그림 4 출력전압 변동에 따른 스위칭 주파수 변동 추이
Fig. 4 Trend of switching frequency according to V_o variation

$$A_p = \frac{K_u A_w \sqrt{1 + D(k^2 - 1)}}{N_p \sqrt{1 + D(k^2 - 1)} + N_s \sqrt{1 - D}} \quad (4)$$

코어 사양이 $A_c=7.1mm^2$, $l_g=0.15mm$ 로 주어졌을 때 $N_p=N_s=38$ 이 얻어지며, $K_u=0.6$, $A_w=7.1mm^2$ 와 같을 때 $A_p=0.082mm^2$ 가 얻어지며, $K_u A_w = N_p A_p + N_s A_s$ 로부터 $A_s=0.029mm^2$ 가 얻어진다.

$V_i=14V$, $V_o=55V$, $I_o=44mA$ 사양의 14인치 LED 백라이트를 위한 BCM TIB 구동회로 시작품을 도출된 설계값을 이용하여 제작했으며, 주요 파형을 그림 5에 보였다. M_1 의 턴 온 시점에 1차측 전류 i_p 가 음이고 M_1 양단전압 v_{ds} 가 0이므로 ZVS가 이루어짐을 확인할 수 있다. M_1 은 IRFL014, D_1 은 1N4934를 사용하였으며, 회로의 효율은 96%로 측정이 되었다.

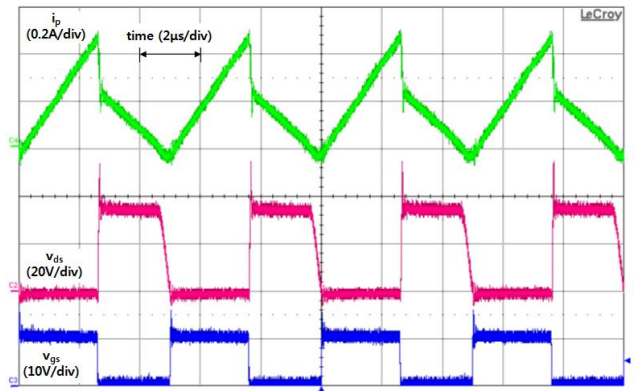


그림 5 14인치 LED 백라이트 구동회로 시작품의 주요 실험 파형
Fig. 5 Key waveforms from 14inch LED BLU driver prototype

4. Conclusion

본 논문에서는 BCM TIB 회로를 분석하여 그 특성을 정량화하였으며, 특히 출력전압 변동에 대한 스위칭 주파수의 변화가 작아 소용량 LED 구동 응용에 적합함을 확인하였다. 또한, 최적의 설계 기준을 제안하고 14인치 LED 백라이트 구동회로 시작품을 제작하여 동작을 확인하였다.

References

- [1] J. H. Park, B. H. Cho, "The Zero Voltage Switching (ZVS) Critical Conduction Mode (CRM) Buck Converter with Tapped Inductor", IEEE Trans. on PE, Vol. 20, No. 4, pp. 762-774, July, 2005.