

입력 전압 범위가 넓은 벅 AC/DC LED 구동기의 역률 개선을 위한 최적 인덕턴스 선택에 관한 연구

김만고[†]

A Study on Optimal Selection of Inductance for Power Factor Improvement of Buck AC/DC LED Driver With Wide Input Voltage Range

Marn-Go Kim[†]

Abstract

Selection of the optimal inductance for power factor improvement of a buck AC/DC light-emitting diode (LED) driver with wide input voltage range is described in this study. The power factor change based on the slope compensation is obtained for various normalized output current (NOC) values using discrete-time domain analysis. The possibility of implementing constant slope compensation is described using power factor curves for various NOC values. $NOC=0.5$ is chosen for the value of inductance with consideration for the simple implementation and reduction of inductor size. Experimental results of the inductance corresponding to $NOC=0.5$ are presented.

Key words: Normalized output current, Buck AC/DC LED driver, PF (Power Factor), Constant slope compensation, Wide input voltage range

1. 서 론

입력 전압이 출력 전압보다 클 때, 그림 1에서 일정 주파수 $f_s=1/T_s$ 로 클럭 주파수가 Set 입력에 인가되면 스위치는 ON 상태가 시작된다. 스위치 ON 상태는 검출된 전류 신호 $R_s i$ 와 기울기 M_e 인 외부 Ramp 신호의 합이 V_c 와 만나는 순간 끝난다. 입력 전원 주파수에 비해 스위칭 주파수가 매우 크다고 가정하면, 역률(Power Factor, PF)을 지배하는 제어 법칙은 다음의 정상상태 스위칭 조건에 의해 결정된다;

$$R_s [I + M_1 DT_s] + M_e DT_s = V_c \quad (1)$$

여기서, I 는 인덕터 전류의 최솟값이며, 시비율 D , V_c 는 제어 입력, $M_1 = [V_i - V_o]/L$ 는 ON 기간 인덕터 전류 기

울기이다.

입력과 출력 전압이 주어지면, 식 (1)은 간단한 다음의 식으로 표현된다.

$$f(S_{ro}, NOC) = 0 \quad (2)$$

여기서, 슬로프 보상 $S_{ro} = LM_e/R_s V_o$, 정규화된 출력 전류 $NOC = I_o/(V_o/f_s L)$, 그리고 I_o 는 부하 전류이다. 앞으로 사용될 NOC는 위의 식에서 인덕턴스값과 비례 관계이다.

지금까지 L값은, 출력 100W 이하를 갖는 경우 넓은 입력전압 범위에서 동작할 때, 저전압에서는 연속전류모드로 동작하고 고전압에서는 불연속전류모드로 동작하도록 설계되었다. 대체로, 이 범위의 인덕턴스값은 $NOC=0.14$ 에 상응하는 크기를 설계의 시작점으로 활용하였다. 전 전압 범위에서 높은 역률 성능을 얻기 위하여 슬로프 보상 S_{ro} 는 가변 슬로프 보상을 사용하여 왔다. 그러나 가변 슬로프 보상은 정확한 구현이 어렵고 관측된 역률도 부스트 컨버터를 이용하여 얻어진 역률에 비해 현저히 낮았다^{[1],[5]}.

최근에 전 전압 범위에서 연속전류모드로 동작하도록 L값을 선택하여 일정한 슬로프 보상을 사용한 연구가

Paper number: TKPE-2021-26-4-10

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: mgkim@pknu.ac.kr, Dept. of Control & Instrumen. Eng., Pukyong Nat'l University, Korea

Tel: +82-51-629-6330 Fax: +82-51-629-6309

Manuscript received Jan. 28, 2021; revised Feb. 8, 2021; accepted Mar. 18, 2021

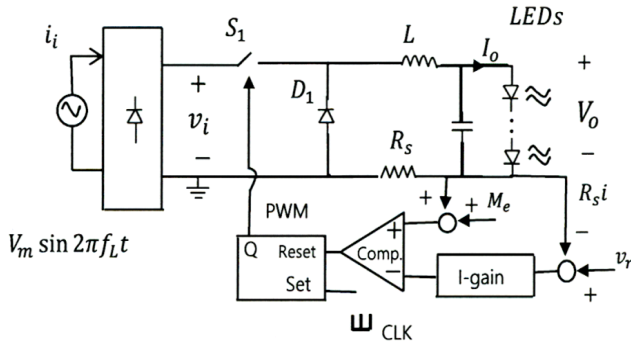


Fig. 1. Constant-frequency buck AC/DC LED driver with wide input voltage range.

발표되었다^[2]. 이 논문에서 제안한 일정한 슬로프 보상은 정확한 구현이 가능하고 측정된 역률 성능은 가변 슬로프 보상에 비해 우수하였다. 하지만, L값은 $NOC=1.29$ 에 상응하는 값으로 과도하게 크게 설계되었다.

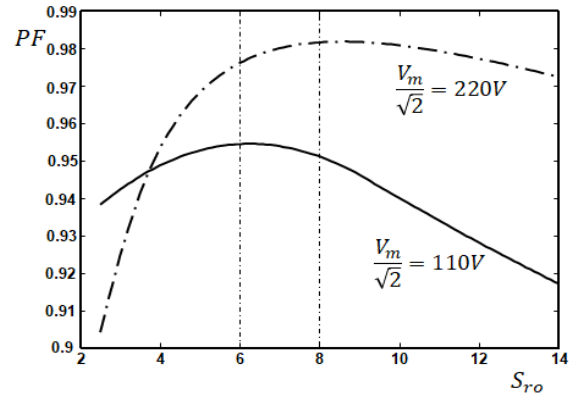
본 연구에서는 입력전압이 넓은 벽 AC/DC LED 구동기의 역률 개선을 위하여 인덕턴스 선택에 대한 가이드라인에 대하여 기술하였다.

2. L값 설계 및 실험 결과

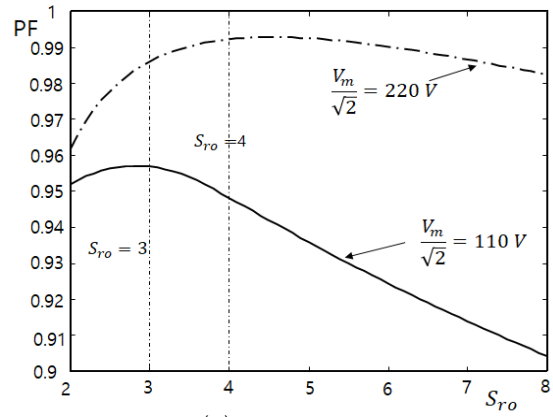
벽 AC/DC LED 구동기의 파라메타가 입력 교류 실효 전압 $V_m/\sqrt{2}$ 의 범위 100-240V, LED current $I_o = 0.6A$, 입력 라인 주파수 $f_L = 60Hz$, 출력 전압 $V_o = 70V$, 그리고 스위칭 주파수 $f_s = 100kHz$ 일 때 적합한 인덕턴스값을 설계하고자 한다. 여기서 인덕턴스값을 선택하기 위하여 NOC값을 큰 값으로부터 작은 값으로 변화시키면서 입력 전압에 따라 변하는 역률 특성을 분석하는 브루트 포스 방법(brute force method)을 사용하였다. 역률 해석은 개선된 방법을 사용하였고^[3], 모든 동작점에서의 시스템 안정도를 만족하기 위하여 슬로프 보상 S_{ro} 값은 1보다 큰 범위에 대해 수행하였다^[4].

그림 2는 NOC값을 변화시키면서 슬로프 보상 S_{ro} 와 역률 PF의 관계를 나타내었다. (a)는 참고문헌 [2]에서 선택했던 NOC값 1.29일 때 S_{ro} 값의 변화에 대한 역률 그래프이다. 110V 입력 전압에서 최대 역률을 제공하는 S_{ro} 는 6, 220V 입력 전압일 때 최대 역률을 제공하는 S_{ro} 는 8이다. 각 전압에 대한 최적 슬로프 S_{ro} 의 차이는 적어서 일정한 슬로프 보상값 $S_{ro} = 7$ 로 설계하여 우수한 입력 역률을 얻을 수 있었다. (b)는 NOC값을 0.5로 선택했을 때, S_{ro} 값의 변화에 대한 역률 그래프이다. 110V 입력 전압에서 최적 S_{ro} 는 3, 220V 입력 전압에서 최적 S_{ro} 는 4이다. 주어진 입력 범위에 대해 일정한 슬로프 보상 S_{ro} 는 중간값 3.5로 선택할 수 있다.

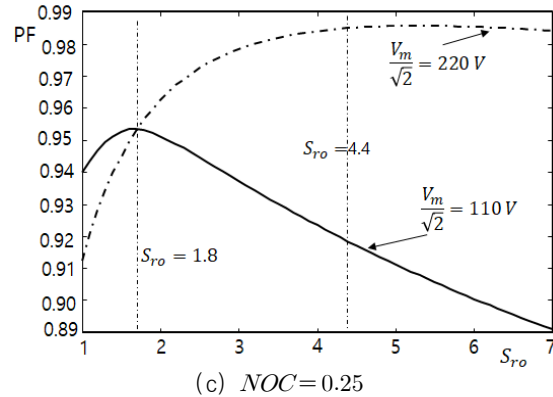
(c)는 NOC값을 0.25로 설계했을 때 슬로프 보상 S_{ro} 의 변화에 따른 역률 그래프이다. 인덕터 전류는 높은



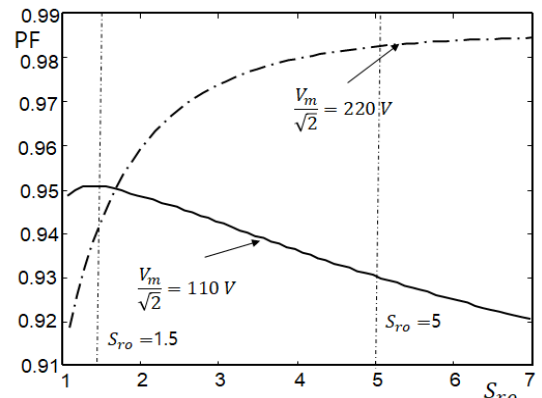
(a) $NOC=1.29$



(b) $NOC=0.5$

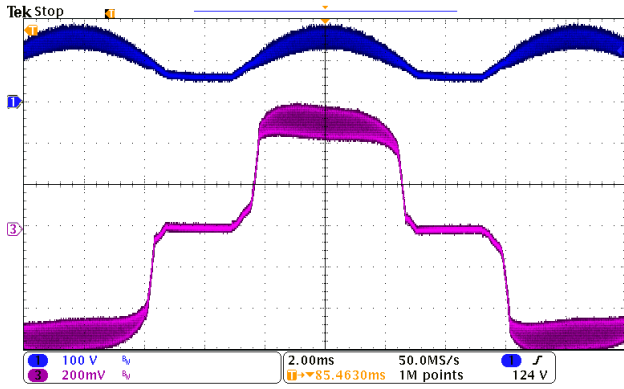


(c) $NOC=0.25$

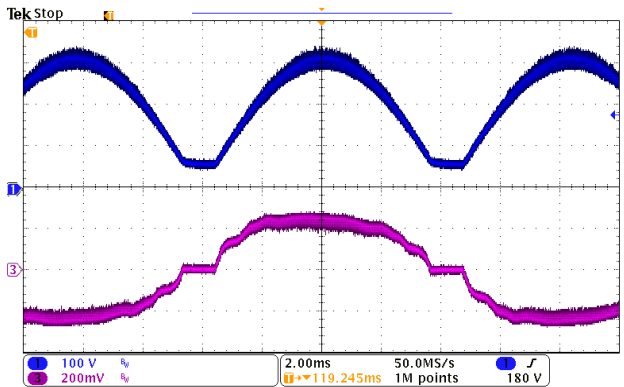


(d) $NOC=0.14$

Fig. 2. Slope ratio S_{ro} vs. PF with the variation of NOC.



(a)



(b)

Fig. 3. Experimental waveforms of input current when input voltage changes. (a) $V_m/\sqrt{2} = 110$ V (PF=0.957), (b) $V_m/\sqrt{2} = 220$ V (PF = 0.991). Horizontal scale: 2 ms/div, vertical scale: upper traces- v_i (100 v/div); lower traces- i_i (0.2 A/div).

입력 전압에서 불연속으로 동작하고 낮은 입력 전압에서 연속전류모드 동작을 한다.

(d)는 NOC값을 0.14로 설계했을 때 슬로프 보상 S_{ro} 의 변화에 따른 역률 그래프이다. 110V 입력 전압에서 최대 역률을 제공하는 S_{ro} 는 1.5이고, 220V 입력 전압에서 최적 S_{ro} 는 5이다. 참고문헌 [1]에서 사용한 인덕턴스값으로 비선형 슬로프 보상기를 사용하였으나 측정된 역률은 이론값에 비해 현저히 낮다.

위의 역률 특성 해석으로부터, NOC값이 0.5 이상일 때 넓은 입력 전압의 범위에 대한 최대 역률을 제공하는 S_{ro} 값의 변화가 작기 때문에 일정한 슬로프를 갖는 외부 램프 보상으로 구현이 가능하다. NOC값이 0.5 미만일 때는 최대 역률을 제공하는 S_{ro} 값은 높은 입력 전압과 낮은 입력 전압에서 편차가 매우 커서 가변 슬로프를 갖는 외부 램프 보상이 요구된다고 볼 수 있다.

일정한 슬로프 보상기 구현의 용이성과 인덕터 크기의 감소를 고려하여 $NOC=0.5$ 에 상응하는 인덕턴스값을 설계값으로 선택하였다. 역률 특성 해석의 유용성을 확인하기 위하여 NOC가 0.5에 해당하는 인덕턴스값 $L = NOC \times (V_o/f_s L_o) = 0.5 \times 70 / (100,000 \times 0.6) \approx 585 \mu H$ 로

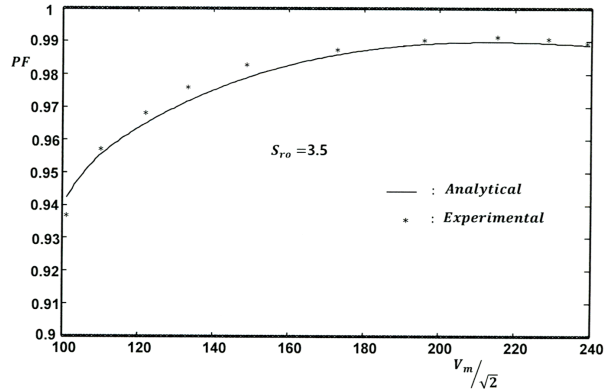


Fig. 4. Input voltage vs. PF for $S_{ro} = 3.5$ ($L = 585 \mu H$).

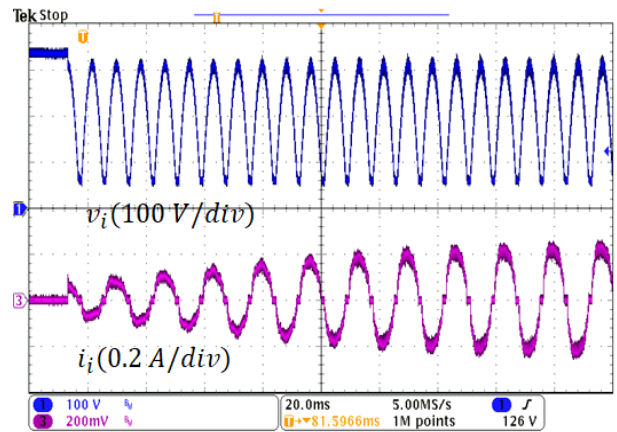


Fig. 5. Transient response at start-up ($V_m/\sqrt{2} = 220$ V). Horizontal scale: 20 ms/div.

선택하고 $S_{ro} = 3.5$ 의 일정한 슬로프 보상기를 사용한 회로를 구현하여 실험하였다^[2]. [2]의 실험회로에서 인덕턴스값 $L = 585 \mu H$, 일정 슬로프 보상기 구현회로 저항은 $R_{11} = 42k$, $R_{12} = 25k$, $R_{13} = 33k$ 로 변경하였다. 입력 전압을 바꿀 때 관측된 입력 전류 파형을 그림 3에 나타내었다. 그림 4에 해석에 의한 이론적인 역률과 측정된 실험 역률을 비교하는 그래프를 제시하였다. 이론적인 역률과 관측 역률은 입력 전압을 100-240V로 변화시킬 때 거의 일치된 결과를 보여주고 얻어진 역률 특성은 매우 우수하다. 기동 시 과도상태의 응답을 측정된 입력 전류와 전압 파형을 그림 5에 보였다. 관측된 입력 전류 파형은 오버 슈트가 없으며 우수한 기동특성을 보이고 있다.

표 1은 인덕터 설계에 사용된 기존의 연구와 본 연구의 비교를 나타낸다. 일정한 슬로프를 갖는 제안된 설계의 측정 역률 성능이 입력 전압이 100-240V일 때 가장 우수함을 보여준다. 일정한 슬로프 보상의 경우, 이론 역률과 측정 역률이 거의 일치하였다. 그러나, [1]에서 가변 슬로프 보상의 측정 역률은 이론 역률보다 현저히 낮다. 이 차이는 램프 보상기로서 가변 슬로프 보상의 정확한 구현이 어렵기 때문으로 추정된다.

TABLE I
COMPARISON BETWEEN PROPOSED AND PREVIOUS
DESIGNS

Parameter	Design	Proposed Design	Previous Designs	
			ref. [1]	ref. [2]
Selected NOC		0.5	0.14	1.29
Designed S_{ro}		3.5	1.5-5	7
Compensation		constant slope	variable slope	constant slope
Measured PF with the change of input voltage $V_m/\sqrt{2}$	240 V	0.988	0.923	0.976
	220 V	0.991	0.950	0.981
	150 V	0.983	0.963	0.977
	110 V	0.957	0.933	0.952
	100 V	0.937	0.909	0.933

3. 결 론

넓은 입력 전압 범위에서 동작하는 벽 AC/DC LED 구동기의 우수한 역률을 얻기 위한 인덕턴스 선택 방법에 대하여 기술하였다. NOC가 0.5보다 작은 인덕턴스값으로 설계할 경우, 인덕터 전류는 높은 전압에서 불연속 전류 모드 구간이 증가하고 입력 전압의 변화에 대한 최적 슬로프 보상값의 변화도 커져 가변 기울기를 갖는 외부 램프가 필요하다. NOC가 0.5 이상일 때, 인덕터 전류는 모든 입력 전압에서 연속전류 모드 동작을 하고 입력 전압의 변화에 따른 최적 슬로프 보상 S_{ro} 값은 작게 변하여 일정한 슬로프 보상으로 우수한 역률을 얻을 수 있다. 그리하여, 넓은 입력 전압 범위에서 우수한 역률을 얻기 위한 인덕턴스 설계를 위한 가이드라인으로 일정한 슬로프 보상이 구현의 용이성과 인덕터 크기의 감소를 고려하여 $NOC = 0.5$ 에 상응하는 L값을 설계값

으로 제안하였다. 인덕턴스 설계값 $L=0.5(V_o/f_s I_o)$ 으로부터, 적정 인덕턴스값은 출력전압 V_o 와 정비례하고, 스위칭 주파수 f_s 와 부하 전류 I_o 의 곱에 반비례한다. 제안된 인덕턴스값을 사용한 실험에서 최대 역률 99.1%를 얻었다.

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019)에 의해 연구되었음.

References

- [1] L. Huber, L. Gang, and M. Jovanovic, "Design-oriented analysis and performance evaluation of buck PFC front end," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 25, No. 1, pp. 85-94, Jan. 2010.
- [2] M. G. Kim, "Slope compensation of buck AC/DC LED driver based on discrete-time domain analysis," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 24, No. 3, pp. 205-212, 2019.
- [3] M. G. Kim, Y. S. Jung, and N. H. Kim, "An improved discrete-time domain analysis for buck derived AC/DC LED driver," in *Proc. 2019 Power Electronics Annual Conf.*, Korea, pp. 469-470, 2019.
- [4] M. G. Kim, "High-performance current-mode-controller design of buck LED driver with slope compensation," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 33, No. 1, pp. 641-649, Jan. 2018.
- [5] Y. T. Jang, and M. Jovanovic, "Bridgeless high-power-factor buck converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 26, No. 2, pp. 602-611, Feb. 2011.
- [6] M. G. Kim, "Error amplifier design of peak current controlled (PCC) buck LED driver," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 29, No. 12, pp. 6789-6795, Dec. 2014.