벅형 AC/DC LED 구동기에 대한 개선된 이산 시간 영역 해석

김 만고, 정영석, 김 남호
부경대학교

An Improved Discrete-Time Domain Analysis for Buck Derived AC/DC LED Driver

Marn-Go Kim, Young-Seok Jung, and Nam-Ho Kim
Pukyong National University

ABSTRACT

본 논문에서는 벅형 AC/DC LED 구동기의 입력 전류 파형을 분석하기 위하여 개선된 이산 시간 영역 해석 방법을 제안한다.

1.서론

LED (Lighting-emitting diode) 기술은 여러 가지 광응용 분야에서 최근에 유망한 광원으로 등장하고 있다. 이것은 고효율, 다양한 색상, 긴 수명, 그리고 친환경성 등의 LED가 가진 특성에 기인한다. LED의 순방향 전압이 큰 허용 오차를 갖는 점을 고려하면 출력 전압제어를 통해 LED 조명의 밝기를 정확하게 제어할 수 없다. 따라서, LED의 순방향 전류를 정확하게 제어하는 것은 일정한 밝기를 갖는 LED 조명의 출력을 얻기위해 중요하다.

LED 구동기에서 요구되는 직류전압은 100 V 이하의 저전압을 필요로한다. AC/DC LED 구동기 회로용으로 벅 컨버터가 널리 이용되고 있다. AC/DC 변환 과정에서 입력의 고조파 성분을 줄이기 위해 역률개선이 요구된다[1].

참고문헌 [2]에서, 벅형 AC/DC LED 구동기의 입력 파형을 분석하기 위해 이산시간 영역 해석방법을 제안한 바 있다. 본 논문에서는 이전의 이산 시간 영역 해석보다 정확도가 개선된 이산시간 영역 해석이 제안된다.

2. 이산 시간 영역 해석

참고문헌 [2]의 이산 시간 영역 해석에서 인덕터 전류는 입력 전압의 각도가 $\theta_d+\triangle\theta$가 되는 순간부터 흐르는 것으로 가정하였다. 그러나, 실제 도통의 시작 순간은 θ_d이후부터 가능하여 입력 전압의 최대 오차 각도는 $\triangle\theta$가 된다. 본 논문에서는 인덕터 전류의 도통 시작 순간을 $\theta_d+\triangle\theta/2$로 가정하였다. 이 경우 도통을 시작하는 입력 전압의 최대 오차 각도는 $\frac{\triangle\theta}{2}$로 되어 기존의 해석법에 비해 오차가 반으로 감소한다. 그림 2에 개선된 이산 시간 영역 해석에 사용된 입력 전압과 인덕터 전류를 나타내었다.

그림 2에서 입력 전압 v_i가 출력 전압 V_o보다 클 때 스위치의 도통이 일어나므로 도통 각의 범위는

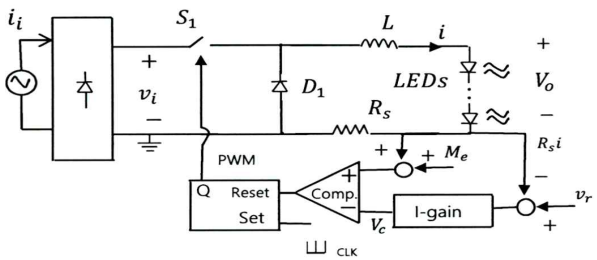


Fig. 1 Constant-frequency buck derived AC/DC LED driver.

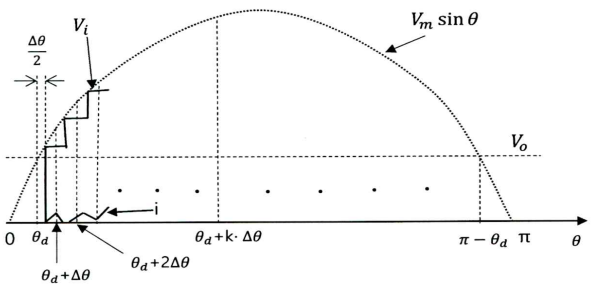
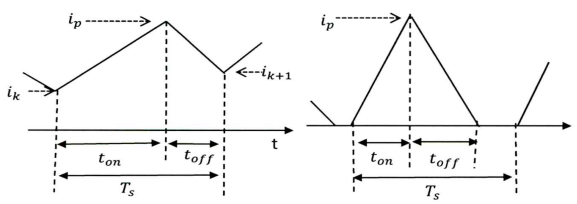


Fig. 2 Improved input voltage and inductor current waveforms of Fig. 1



(a) CCM (b) DCM

Fig. 3 Operating modes of inductor current

$\theta_d<\theta<\pi-\theta_d$이다. 여기서, $\theta_d=\sin^{-1}(V_o/V_m)$이다. 도통 구간 동안에 입력 전압은 각 스위칭 주기 T_s의 시작 순간 전압의 값 V_i으로 두고 한 주기 동안 해석을 수행할 수 있다. 각 스위칭 주기의 중심에서 입력 전압은 다음과 같다;

$$V_i(k)=V_m\sin(\theta_d+k\triangle\theta-\frac{\triangle\theta}{2}) \quad (1)$$

여기서, $\triangle\theta$는 스위칭 주기 T_s 동안 입력 전압의 각

변동분으로 $\triangle\theta = 2\pi f_L T_s$ 이다. f_L은 전원주파수이고, k=1,2,3,...,N은 스위칭 주기의 순서를 나타내는 자연수이다. 최대값 N은 $[\theta_d, \pi-\theta_d]$동안에 발생하는 스위칭 주기의 개수로 가우스 함수 N=$[\frac{\pi-2\theta_d}{\triangle\theta}]$로 표시된다.

그림 1에서 클럭 주파수가 Set 입력에 일정 주파수 f_s=1/T_s로 인가되면 스위치 ON 상태가 시작된다. 스위치 ON 상태는 전류 검출된 신호와 기울기 M_e를 가진 외부 신호의 합이 제어 신호 V_c와 만나는 순간 끝난다. 입력 전압이 출력 전압보다 커지는 최초의 입력 전압은 $V_m \sin(\theta_d + \triangle\theta/2)$이고, 인덕터 전류 i의 초기 값은 i_1=0이다.

클럭 신호가 Set 입력에 인가되어 스위치가 ON 된다. k번째 주기의 스위치 도통 시간 t_{on}은 제어 법칙에 의해 결정되거나[2] 최대 시비율에 의해 다음과 같이 된다;

$$t_{on}(k) = \min\left(\frac{V_c - R_s i_k}{m_1(k)R_s + M_e}, D_{\max} T_s\right) \qquad (2)$$

여기서, i_k는 k번째 주기의 인덕터 전류 초기값이며, ON 기간동안 양의 인덕터 전류 기울기 $m_1(k) = [V_i(k) - V_o]/L$, V_c는 제어 입력이다.

스위치 ON 시간의 말기의 인덕터 피크 전류는 다음과 같이 표현된다;

$$i_p(k) = i_k + m_1(k) t_{on}(k) \qquad (3)$$

식 (2)의 조건에 의해 스위치가 턴-오프되면 인덕터 인덕터 전류는 선형적으로 감소한다.

도통 시간이 같을 경우, DCM 동안 t_{off}시간은 CCM의 t_{off}시간보다 항상 작으므로 t_{off} 시간은 다음과 같다.

$$t_{off}(k) = \min(T_s - t_{on}(k), i_p(k)/m_2) \qquad (4)$$

여기서, OFF 기간 동안 감소하는 인덕터 전류 기울기 $m_2 = V_o/L$.

k번째 스위칭 주기의 인덕터 전류 말기값은 다음과 같이 기술된다;

$$i_{k+1} = i_p(k) - m_2 t_{off}(k) \qquad (5)$$

DCM에서 $i_{k+1} = 0$이 된다.

식 (5)의 k번째 주기의 인덕터 전류 말기 값은 (k+1)번째 주기의 초기 값으로 쓰여진다.

다음 주기의 벅 컨버터 동작은 같은 방법으로 반복 해석할 수 있다.

그림 3으로부터 k번째 주기동안 인덕터 전류의 평균 전류는 다음과 같다;

$$I_{avg}(k) = f_s[0.5(i_k + i_p(k))t_{on}(k) + 0.5(i_p(k) + i_{k+1})t_{off}(k)] \qquad (6)$$

k번째 주기 $\triangle\theta$ 동안 입력 전류 i의 스위칭 주기 당 평균 전류 I_i는 전력 균형 (Power balance)을 이용하여 다음과 같이 기술할 수 있다;

$$I_i(k) = I_{avg}(k)\, V_o / V_i(k) \qquad (7)$$

입력 전류의 실효값(rms value)은 수치 해석에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_{\theta_d}^{\pi-\theta_d} i_i^2 d\theta} \approx \left[\frac{1}{\pi}\sum_{k=1}^{N} I_i^2(k)\triangle\theta\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (8)$$

그림 4의 파형을 살펴보면, 기본파 입력 전류의 실효값은 퓨리에 해석을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$I_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}\frac{2}{\pi}\int_{\theta_d}^{\pi-\theta_d} i_i \sin\theta\, d\theta \approx \frac{\sqrt{2}}{\pi}\sum_{k=1}^{N} I_i(k)\sin(\theta_d + k\triangle\theta)\cdot\triangle\theta \qquad (9)$$

LED를 통해 흐르는 평균 전류는 다음과 같이 계산된다.

$$I_o = \frac{1}{\pi}\int_{\theta_d}^{\pi-\theta_d} i d\theta \approx \frac{\triangle\theta}{\pi}\sum_{k=1}^{N} I_{avg}(k) \qquad (10)$$

결국, 식 (8)- (10)를 사용하여 역률 PF (Power factor)은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\text{PF} = \frac{\sqrt{2}\, V_o I_o}{V_m I_s} = \frac{I_1}{I_s} cos\ \phi \qquad (11)$$

여기서, ϕ는 기본파 입력 전류와 입력 전압의 위상차로 $\phi \approx 0$이다.

이산 시간 영역에서 지금까지 서술한 개선된 식을 이용하여 MATLAB 으로 계산된 역률은 유효숫자 5자리까지 이전의 방법의 결과와 같았다. 본 연구의 결과로부터 입력전압의 도통 시작점의 최대 위상오차 $\triangle\theta$는 입력전류 파형 해석에 영향이 거의 없다는 점을 보여준다.

참고 문헌

[1] L. Huber 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] 김만고, 정영석, 김남호, " 벅형 AC/DC LED 구동기의 이산시간 영역 해석", pp. 314- 315, 2018 Power Electronics Annual Conference.

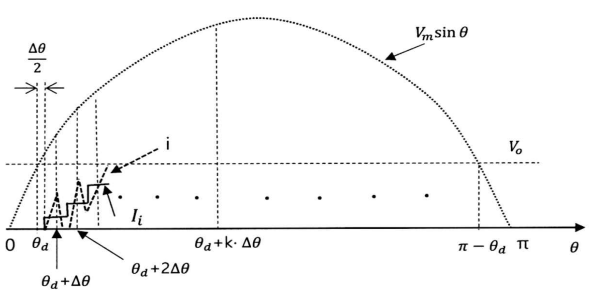


Fig. 4 Angular relationship between discrete-time average input current I_i and $\sin\theta$ for numerical integration of fundamental input current component