

통계적 방법론에 기반한 선형 LED 구동회로의 최적 설계

박준영, 최성진
울산대학교

Design optimization of a linear LED driver using a computational statistics

Jun Young Park, Sung Jin Choi
School of Electrical Engineering, University of Ulsan

ABSTRACT

저가형 저전력 LED 구동회로에서는 종종 직렬 저항을 이용한 전류 밸런싱 회로를 사용한다. 이러한 회로에서 밸런싱 저항은 양산시 생기는 LED 순방향 전압의 편차에 관계없이 LED 스트링간의 전류 밸런싱을 유지시키는 역할을 한다. 본 논문에서는 직렬 저항의 공칭값과 공급 전압값을 최적설계하기 위한 효과적인 설계 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 몬테카를로 기법을 사용하여 순방향 전압의 통계적인 산포와 직렬저항 소자의 상용값 및 공차를 동시에 고려하고, 비용 함수를 도입하여 회로 최적화를 진행한다. 기존의 설계 방법 대비 성능 개선 정도를 구체적인 설계사례를 통해 비교 분석함으로써 제안 방법을 검증한다.

1. 서론

LED는 친환경적이고 긴 수명으로 인해서 조명 및 디스플레이 분야에서 많이 사용하며, 일반적으로 직렬연결된 LED 스트링을 필요한 광량만큼 병렬로 연결하여 사용한다. LED는 동작 전압에서 전압의 양산시 산포가 발생하기 때문에 LED의 균일한 밝기를 보장하고 수명 단축으로부터 LED를 보호하기 위해서 구동회로는 각 LED 스트링에 전류를 균등분배해야 한다. 선형 또는 스위칭 파워컨버터 드라이버를 포함하는 여러 가지 전류 밸런싱 방법 중에서 그림1의 선형 수동 구동회로는 회로가 단순하고 가격이 저렴하므로 LED 칩의 수가 적고 순방향 전류가 작은 저전력에서 종종 사용한다. 이 회로에서 앞단의 전원 공급회로는 균일한 전압을 공급하고 각 배열의 직렬저항은 LED 순방향 전압의 산포에 관계없이 전류를 균등분배한다. 기존 설계방법에서는 허용되는 최대 전력소비와 목표로 하는 LED 전류에 대한 설계공식을 계산한 후에 계산된 값에 가장 근사한 공칭 저항값을 선택한다. 본 논문에서는 몬테카를로 기법을 사용하여 공칭값의 상용값과 함께 LED 순방향 전압과 직렬저항의 통계적인 확률분포를 고려하여 공급전압과 직렬저항을 최적으로 설계하기 위한 효과적인 알고리즘을 제안한다.

2. 파라미터영역 정의

직렬저항(R_S)값과 LED 스트링전압(V_D)값으로 그림2와 같은 파라미터 영역을 정의하자. 실제로, 저항과 LED는 양산 시 같은 공칭값의 로트(lot)로부터 무작위 선택될 것이므로 R_S

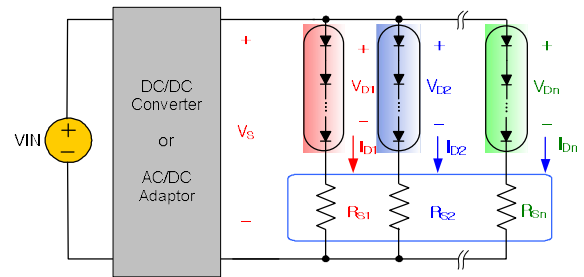


그림 1 수동 선형 LED 드라이버
Fig. 1 Passive linear LED driver

와 V_D 의 정확한 값은 모든 샘플을 측정하지 않는 한 알 수 없다. 만약 R_S 와 V_D 가 공차를 가진다면, 회로의 동작은 R_S V_D 를 변수로 하는 그림2 좌측의 파라미터영역에서의 사각형영역에 놓이며 이를 공차영역(Region of Tolerance, ROT)라고 한다. LED의 전류는 다음과 같고,

$$I_D = (V_S - V_D) / R_S$$

(1)이때, V_D 는 LED 스트링전압이고 V_S 가 DC/DC 컨버터 출력 전압이며 R_S 는 직렬 밸런싱 저항이다. 최소광량을 확보하기 위한 하한 LED 전류제한은 다음과 같고

$$I_D \geq I_{D,MIN}$$

(2)이것은 R_S V_D 파라미터 영역에서 기울기는 $I_{D,MIN}$ 이고 V_S 의 y절편을 가지는 직선 아래의 영역으로 매핑된다.

한편, 저항에서의 소비전력은 다음과 같이 표현될 수 있고

$$P_R = (V_S - V_D)^2 / R_S \quad (3)$$

아래의 식처럼 최대손실로서 제한된다.

$$P_R \leq P_{R,MAX} \quad (4)$$

이 조건은 그림2에서 V_S 의 y절편을 통과하는 포물선의 위쪽 영역에 매핑된다. 따라서, 식 (2)와 (4) 사이의 겹치는 영역이 허용영역(Region of Acceptability, ROA)이다. 양산된 회로가 ROA 영역에 놓인다면 회로의 동작은 사양을 만족할 것이고 밖에 있다면 설계 사양을 만족시키지 못한다고 할 수 있다.

3. 제안 알고리즘

제안 알고리즘에서는 LED 스트링전압(V_D)는 그림2의 상한과 하한을 가지는 절단형 정규분포를 따르는 확률변수로 가정하며 LED소자의 공칭값에 직렬연결된 수를 곱한값을 평균으로 가진다. 마찬가지로 직렬저항값은 절단형 정규분포에서의

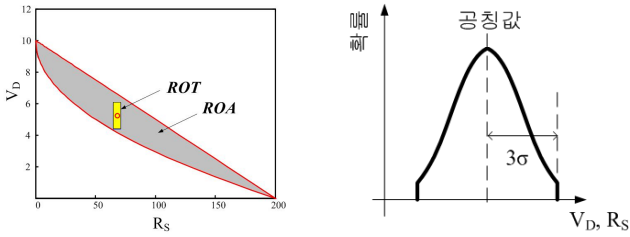


그림 2 파라미터영역과 통계적 분포
Fig. 2 Parameter space and statistical distribution

확률변수이며 E12, E24 등에서 정의하는 표준 수만을 가질 수 있다. LED 스트링전압의 공차는 각각의 직렬연결된 개별 공차에 LED수를 곱한 값이 된다. 일반적으로 상한과 하한 사이의 표준편차는 6배라고 가정한다. 그림2 우측에서 ROT안의 작은 원이 공칭값 중심이다.

그림3은 제안하는 알고리즘이다. 주어진 LED 사양과 고정된 LED 배열구조로부터 계산된 V_D 의 공차와 공칭값을 가지고 시작한다. 최적화를 하기 위해서 공급전압 V_S 도 설계변수로 간주한다. 각각의 공급전압에서 설계동작을 확인하기 위한 몬테카를로 분석을 시행하고 상용값 중에서 R_S 의 공칭값을 선택한 뒤에 각각의 설계점에서의 성능을 다음과 같은 비용함수로 계산 가능하다.

$$P = w_1 \cdot S / S_{MAX} + w_2 \cdot C / C_{MAX} + w_3 \cdot L / L_{MAX} \quad (5)$$

$$0 \leq w_1, w_2, w_3 \leq 1, w_1 + w_2 + w_3 = 1 \quad (6)$$

여기서, w_1, w_2, w_3 는 가중치이고 S는 LED 전류의 정규화된 표준편차, C는 정규화된 평균 LED 전류, 그리고 L은 직렬저항의 정규화된 전력손실을 나타내는 성능지표이며 다음과 같이 정의된다.

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{V_S - V_{D,i}}{R_{S,i}} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{V_S - V_{D,i}}{R_{S,i}} \right)^2} \cdot \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{V_S - V_{D,i}}{R_{S,i}} \right)^{-1} \quad (7)$$

$$C = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{V_S - V_{D,i}}{R_{S,i}} \right) \cdot I_{D,MIN} \quad L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(V_S - V_{D,i})^2}{R_{S,i}} \cdot \frac{1}{P_{R,MAX}} \quad (8)$$

4. 성능검증

성능검증용 회로는 $I_{D,MIN}=50mA$, $P_{R,MAX}=0.5W$ 를 설계사양으로 하였다. 순방향전압이 최대 3.03V, 최소 2.19V, 공칭값 2.61V의 LED소자 두 개로 LED 스트링을 구성하였다. 직렬저항은 E24에서 선택한다고 가정한다면 공차는 +/- 5% 값으로 정해진다. 몬테카를로 샘플 수는 1000으로 설정하고 절단형 정규분포를 따른다고 가정한다.

표1은 기존 설계방법으로 얻어진 설계해와 제안방법으로 설계된 해의 성능비교 표이다. 기존 설계방법에서는 조건을 만족하는 가장 가까운 상용저항 값으로 설계한다. 가중치는 설계시 비중을 어디에 두느냐에 따라 선택할 수 있는데 (w_1, w_2, w_3)을 (0.8,0.1,0.1), (0.1,0.8,0.1), (0.1,0.1,0.8), (0.33,0.33,0.33)으로 두고 이것을 각각 #1, #2, #3, #4로 두었다. 각각의 설계전략에서 비용함수 P가 최소가 되는 값을 표에 나타내었다. 그림4와 같이 기존방법은 양산시 편차를 충분히 고려하지 못하므로 설계

결과에 따라 전류사양을 벗어나기도 한다. 제안방법은 양산 시 편차를 충분히 고려하여 더 정밀한 전류밸런싱 성능을 보여준다.

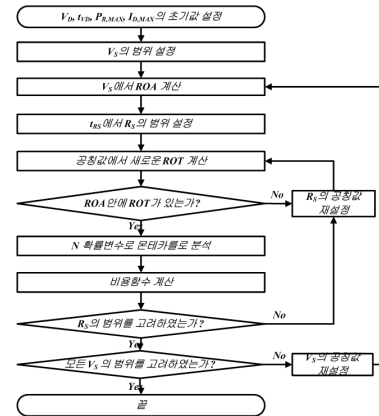


그림 3 제안 알고리즘
Fig. 3 Proposed algorithm

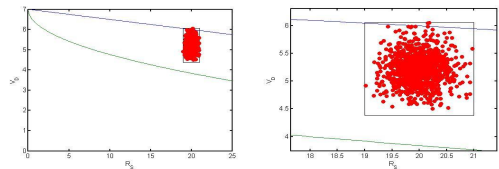


그림 4 기존방법 설계해의 양산시 산포
Fig. 4 Production spread of conventional design

표 1 성능 비교

Table 1 Performance comparison

설계방법	설계해		비용함수				
	V_S	R_S	S	C	L	P	
기존방법	7.0	20.0	0.16	0.56	0.32		
제안방법	#1	10.5	82	0.06	0.78	0.68	0.47
	#2	7.0	15	0.16	0.42	0.43	0.59
	#3	7.5	27	0.13	0.59	0.39	0.61
	#4	8.0	30	0.10	0.54	0.61	0.69

5. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 통계적인 몬테카를로 시뮬레이션과 비용함수로부터 제안하는 알고리즘이 양산 시 최적의 수동 선행 LED 구동회로를 설계할 수 있음을 검증하였다. 제안알고리즘은 다른 형태의 LED 구동회로에도 적용이 가능할 것으로 예상된다.

참고 문헌

- [1] M. Khatib, "Ballast Resistor Calculation : Current Matching in Parallel LEDs", Texas Instrument Application Report SLVA325, 2009.
- [2] S. J. Choi and T. H. Kim, "Symmetric Current Balancing Circuit for LED Backlight with Dimming", IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 59, No. 4, pp. 1698 1707, 2012.
- [3] M. L. D. Casale, N. Femia, P. Lamberti, and V. Mainardi, "Selection of Optimal Closed Loop Controllers for DC DC Voltage Regulators Based on Normal and Tolerance Design", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 51, No. 4, pp. 840 849, 2004.