

LED 구동전류의 피크값이 저감된 전해 커패시터 없는 AC-DC 컨버터

강경숙¹, 박권식², 서병준², 노의철[†]

AC-DC Converter for Electrolytic Capacitor-less LED Driver with Reduced LED Peak Current

Kyoung-Suk Kang¹, Gwon-Sik Park², Byung-Jun Seo², and Eui-Cheol Nho[†]

Abstract

A new single-stage flyback power converter with PFC for electrolytic capacitor-less LED driver is proposed in this study. This method minimizes the peak-to-average ratio of the LED driving pulsating current by adding the LED driving current near the LED current valley area, as well as the third harmonic component injection into the input current. The reduced peak current value of the LED drive current minimizes the thermal stress of the LED itself, thereby increasing the reliability of the LED, as well as achieving a long lifetime. Simulation and experimental results show the usefulness of the proposed topology.

Key words: Harmonic current injection, Electrolytic capacitor-less, PFC flyback, LED driver

1. 서 론

HB-LED(High Brightness Light Emitting Diode)는 고효율, 장수명, 친환경적 장점이 있어 에너지 효율을 높이는 핵심 부품으로 주목받고 있다. 2015년 기준 세계 LED 시장 규모는 165억 달러에 이르고 있으며, 현재는 LED 산업의 성장을 이끌었던 디스플레이 및 모바일 BLU 시장은 성숙 및 정체기에 진입하였고, 조명용 시장이 새로운 성장 동력으로 부상하고 있다^[1].

미국 DOE(Department of Energy)에서는 2020년에는 LED패키지의 광효율이 218lm/W까지 상승할 것으로 예상하고 있는데, LED 광출력의 획기적인 향상은 LED를 보다 저전력으로 사용할 수 있게 한다.

이런 기술적 발전으로 LED를 이용한 조명 기술은 일상 조명 뿐만 아니라 경관용, 자동차, 농업, 의료, 선박 등 다양한 분야로 확대해 나가고 있어 향후 조명으로서

의 LED 수요는 계속 늘어날 것으로 전망된다.

또한, LED는 기존 형광등에 비해 다양한 디자인으로 제작할 수 있으며, 색온도 조절과 디밍(Dimming)기능으로 사용자의 취향에 맞는 조명을 선택할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 LED의 기술 향상과 수요에도 불구하고, LED 조명 보급에 있어 문제점은 LED의 수명을 따라가지 못하는 전원장치에 있다.

상용 전원은 교류로 제공되므로 LED를 구동하기 위해서는 AC-DC 컨버터 사용이 일반적이므로, LED구동을 위한 DC를 공급하기 위해 다양한 컨버터들이 제안되었다. 컨버터를 사용하는데 있어 고려해야 할 점 중 하나가 역률(Power Factor)인데 KS에서는 5[W]를 초과하는 컨버터는 역률 0.9 이상을 만족하도록 규정하고 있으므로^[2] 역률 보정을 위한 PFC(Power Factor Correction)가 필수적이다.

PFC를 위한 AC-DC컨버터와 변환된 DC를 원하는 DC로 변환하기 위한 DC-DC컨버터가 결합된 two-stage 방식은 stage별 최적 설계가 가능하다는 장점이 있지만 제작 단가가 비싸고 사용되는 부품이 많아 크기가 커지게 된다. 반면, 저가격이면서도 신뢰성 있는 동작을 위한 PFC가 가능한 single-stage 컨버터에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다^[3].

LED의 신뢰성 있는 구동을 위해서는 입력 전력의 평균을 가지고 있는 순수 DC가 유리하다. 이런 순수 DC

Paper number: TKPE-2018-23-1-8

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

[†] Corresponding author: nhoec@pknu.ac.kr, Dept. of Electrical Eng., Pukyong National University

Tel: +82-51-629-6317 Fax: +82-51-629-6305

¹ Dept. of LED Convergence Eng., Pukyong National University

² Dept. of Electrical Eng., Pukyong National University

Manuscript received Dec. 28, 2017; revised Jan. 5, 2018;

accepted Jan. 11, 2018

를 얻기 위한 다양한 토폴로지가 제안되었다. 그런데 입력 교류 주파수의 2배에 해당하는 맥동하는 전류 성분을 필터링하기 위하여 대용량의 커패시터가 필요한데 전해 커패시터가 주로 사용된다. 그러나, 전해 커패시터는 LED에 비해 수명이 2,000~5,000 시간에 지나지 않을 정도로 짧아서 LED 전원장치의 장수명을 제한하고, LED 전원장치의 수명이 LED 조명 시스템의 수명을 제한하므로 전해 커패시터를 제거하기 위한 다양한 토폴로지가 제안되었다^{[4]-[6]}.

한편, LED의 광속은 LED 구동 전류의 평균값에 따라 증가하므로 맥류를 허용하는 방식에 대한 연구도 수행되었는데, 광속은 높은 전류에서 포화되는 경향이 있으므로 허용 범위 내에서 동작하는 것이 중요하다^{[7]-[11]}. LED를 구동함에 있어 광효율(Luminous Efficacy, lumen/watt)은 올리면서 맥동 전류의 최대치를 줄여서 LED 내부 접합부 온도 상승을 최소화하여 LED의 신뢰성을 확보하는 것이 중요하다. 이러한 목적으로 교류 입력 전류에 고조파를 주입하여 LED 구동 전류의 피크값을 줄이는 기법이 제안되었다^[12].

본 논문에서는 PFC single-stage Flyback 컨버터에 보조회로를 추가하여 출력단의 전해 커패시터를 필름 커패시터로 대체하고, 출력 전류의 peak-to-average 비를 줄이는 토폴로지를 제안하고자 한다. 제안하는 기법은 역률은 0.9를 충족하면서 출력 전류의 리플은 줄이고 평균 전류를 증가시켜 LED의 장수명화는 물론 LED의 신뢰성을 높이도록 하였다.

LED 구동 시스템은 50[W]급으로 설계되었으며 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 회로의 타당성을 검증하였다.

2. 제안하는 컨버터 구성

그림 1은 제안하는 AC-DC 컨버터의 회로도이다. 플라이백 컨버터에 사용된 자화 인덕턴스(L_m)은 600[μ H]이고 변압기의 권선비는 4:1이다. 스위치 S_1 의 스위칭 주파수는 50[kHz]로 불연속 모드로 동작하며 역률 보정과 출력 전력을 제어한다.

출력측 커패시터(C_o)는 10[μ F]으로 기존 방식에서 출력 전압의 120[Hz] 리플 성분을 줄이기 위해 사용하는 전해 커패시터와 비교하여 매우 작은 용량이다. 출력 전류의 리플을 줄이기 위하여 LED부하단 앞에 인덕터(L_o)가 추가되었으며 용량은 30[μ H]이다. 다이오드 정류기 뒷단에 연결된 보조회로는 스위치 S_2 와 C_i 가 직렬로 연결되어 있다. C_i 는 1[μ F]로 출력단의 C_o 에 비해 1/10 수준이다. C_i 에 충전되는 전류 i_{ci} 는 정류기를 거친 전압(V_1)이 증가하는 영역에서 S_2 의 바디 다이오드를 통해 흐른다. 이렇게 충전된 에너지는 S_2 의 턴-온 동작에 의해 정류전압 V_1 의 최저점 근처에서 방전된다. 방전된 에너지는 LED 구동 전류에 더해진다.

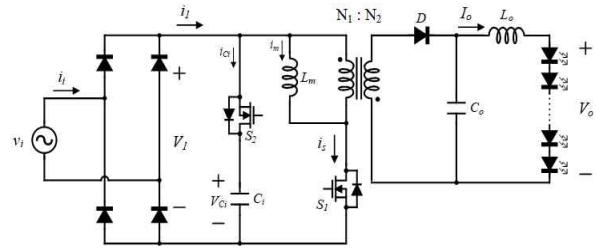


Fig. 1. Proposed PFC single-stage Flyback converter.

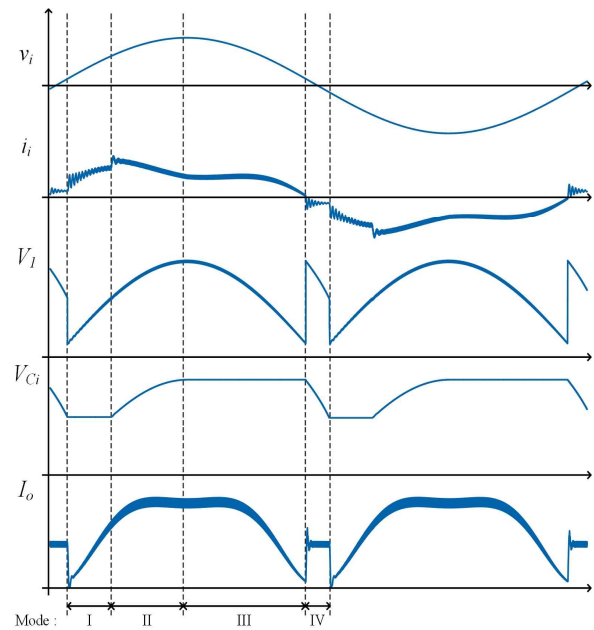


Fig. 2. Waveform of v_i , i_i , V_1 , V_{ci} , and I_o .

C_i 에 충전되거나 방전되는 에너지는 주 전류인 i_s 와 비교하여 매우 작은 값이므로 S_2 의 전력 용량 또한 작다.

3. 각 모드의 동작 원리

그림 2는 제안된 토폴로지의 한 주기에 대한 v_i , i_i , V_1 , V_{ci} , I_o 를 나타내며 4개의 서로 다른 동작 모드로 구성되는데 Mode I ~ Mode IV로 구분하여 나타내었다.

I_o 의 파형을 보면 피크값 부분이 평평한데 이는 입력 전류에 3고조파를 주입하도록 S_1 을 스위칭하였기 때문이다. 각각의 모드에 대한 동작 원리를 설명하면 다음과 같다.

1) Mode I

입력 전류 i_i 는 기존의 PFC와 같은 방식으로 증가한다. 그림 3(a)에 나타낸 바와 같이, S_1 는 턴-온과 턴-오프 동작을 반복하고 S_1 이 on되면 L_m 에 에너지가 저장되고, off가 되면 L_m 에 저장된 에너지는 변압기를 통해 LED 부하로 전달된다. Mode I 동안 부하 전력은 ac 입

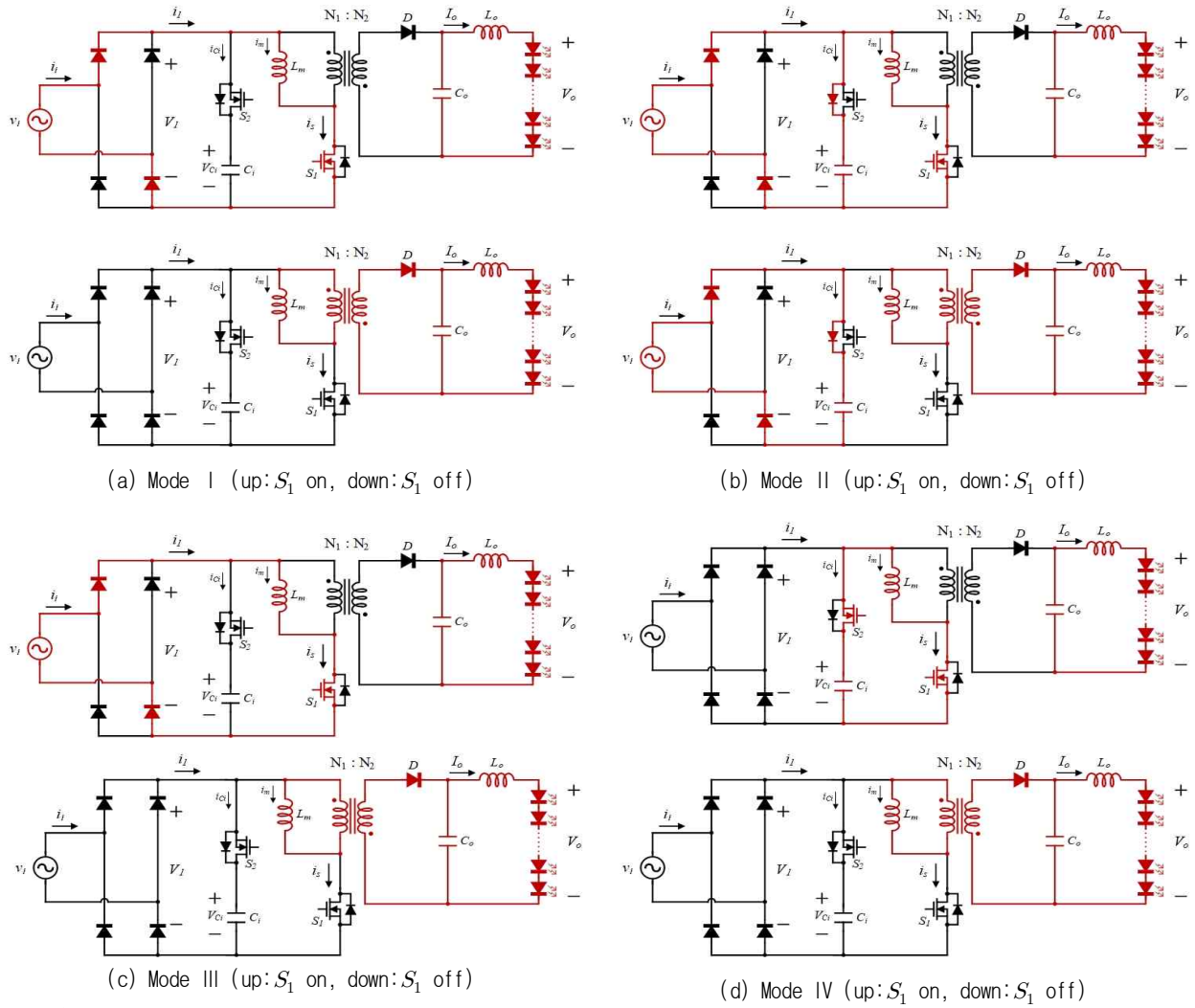


Fig 3. Current Path in each operating mode.

력측으로부터 공급받으므로 부하 전류 I_o 는 입력전류 i_i 와 유사한 파형을 나타낸다.

2) Mode II

S_1 은 Mode I과 마찬가지로 턴-온, 턴-오프 동작을 반복하고 있다. v_i 가 V_{ci} 보다 커지기 시작하면 보조회로의 S_2 의 다이오드가 on되면서 보조회로의 C_i 에 에너지가 저장되기 시작하고, 이 모드는 V_1 이 최대값이 될 때까지 계속된다. 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 입력 전류 i_i 는 보조회로 커패시터 충전 전류 i_{ci} 와 주 스위치의 전류 i_s 의 합이 된다.

3) Mode III

그림 3(c)에 나타난 바와 같이 S_1 은 턴-온, 턴-오프 동작을 반복하고 있으며 C_i 에 충전된 에너지에 의한 전압은 V_1 보다 커서 더 이상 충전되지 않고 V_1 의 피크값을 유지하고 있다.

4) Mode IV

기존 방식에서는 Mode IV의 I_o 가 0으로 떨어져 I_o 의 peak-to-average 비가 높게 되는데, 본 논문에서 제안하는 토폴로지에서는 비율을 더 낮게 한다. C_i 에 저장된 에너지는 S_2 가 on되면 방전하면서 부하단에 전력을 공급한다. 기존 방식에서는 이 구간에서 부하로 전달되는 전력이 매우 작지만 제안한 방식에서는 기존보다 10배 이상의 전력을 전달할 수 있다.

그림 3(d)에서 보듯이 S_2 가 온되어 있는 상태에서 S_1 이 온되면 스위치 전류 i_s 는 다음과 같이 증가한다.

$$i_s = \frac{v_{ci}}{L_m} \times t \tag{1}$$

S_1 이 오프되면 C_i 의 방전은 정지되는데 Mode IV에서 S_1 의 온-오프가 50[kHz]로 이루어지므로 C_i 의 에너지는 다음과 같이 서서히 방전한다.

$$V_{C_i} = V_{C_i}(0) - \frac{1}{C_i} \int_0^t i_s dt \quad (2)$$

따라서, 이 구간에서 S_2 가 온되었을 때 보조 커패시터의 에너지를 부하로 전달하게 된다. 이 때 부하의 전류는 설정한 값으로 일정하게 출력된다. 기존의 방식에서는 출력 전류가 0으로 떨어지는데 제안한 방식은 전류를 상승시켜 전체적인 peak-to-average비를 줄일 수 있다. 보조 커패시터에서 에너지가 방출되는 동안 입력 전류는 0이므로 입력 전류의 THD는 상승하게 되므로, IEC 61000-3-2에 만족하는 고조파 차수와 역률 0.9 이상을 만족하는 동시에 peak-to-average비가 최소인 구간을 적절히 설정하여야 한다. S_2 를 통해 흐르는 전류는 이 구간에서만 흐르고 스위칭도 온/오프가 한번만 이루어지므로 주 스위치 S_1 에 비해 열손실이 무시할 정도로 적다.

4. 시뮬레이션

본 논문에서 제안하는 컨버터의 시스템 파라미터는 표 1과 같다.

제안하는 방식의 시뮬레이션 결과와 기존 방식의 결과를 비교해보기 위하여 먼저 기존 방식에 대한 시뮬레이션 결과를 보이도록 한다.

그림 4는 입력 전류에 고조파 주입이 없는 기존 방식에서의 입력 전압, 입력 전류, 출력 전류를 나타낸다. 입력 전압과 입력 전류는 거의 모양이 같으므로 역률은 1에 가깝지만 출력 전류가 120[Hz] 리플 성분을 그대로 포함하고 있으므로 출력 전류의 peak-to-average비는 2이다.

그림 5는 입력 전류에 3고조파가 주입되었을 때의 파형이다. 3고조파가 주입되었기 때문에 입력 전류의 파형이 그림 4의 파형과는 다르다. 이 경우 출력 전류의 peak-to-average 비는 1.550이며 역률은 0.93정도로서 규정에서 정하고 있는 0.9 이상을 만족한다. LED를 통해 흐르는 전류의 피크값이 그림 4의 경우 보다도 현저히 낮아져서 LED의 과열을 방지할 수 있다.

그림 6은 제안하는 회로에서의 파형을 나타내었다. 역률은 0.925이고 출력 전류의 peak-to-average비는 1.451로 그림 4의 기존 방식에 비해서는 40.4%, 그림 5의 기존 방식에 비해서는 6.8% 더 낮아진 것을 확인할 수 있다.

표 2에 기존의 고조파 주입이 없는 방식, 3고조파 주입 방식 및 제안된 방식에 대한 출력 전류의 특성을 비교하여 나타내었다.

그림 6과 같이 출력 전류의 피크값을 저감하려면 입력 전류에 고조파 성분이 포함되는데 IEC 61000-3-2 Class C에서 규정하는 값을 만족하는지 확인하기 위한 시뮬레이션 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 알 수 있듯이 각 고조파 성분의 크기는 기준치 이내로 만족한다.

TABLE I
SIMULATION PARAMETERS

Parameter	Value
V_i	220[V], 60[Hz]
C_i	1[μ F]
L_m	600[μ H]
$N_1 : N_2$	4:1
C_o	10[μ F]
L_o	30[μ H]
P_o	50[W]

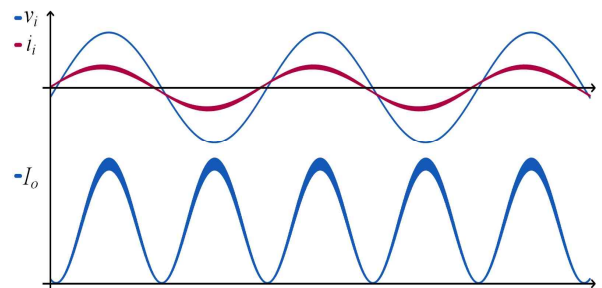


Fig. 4. Waveforms of v_i , i_i , and I_o in case of conventional topology without harmonic injection.

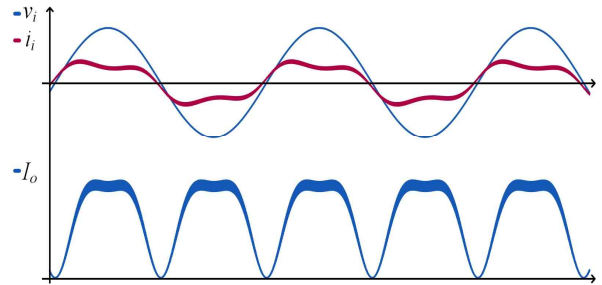


Fig. 5. Waveforms of v_i , i_i , and I_o in case of conventional topology with harmonic injection.

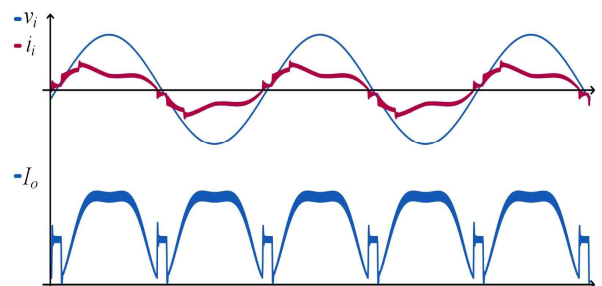


Fig. 6. Waveforms of v_i , i_i , and I_o in case of proposed topology.

5. 실험

시뮬레이션과 동일한 시스템 파라미터로 하드웨어를 제작하였고 파형 측정은 YOKOGAWA社의 DL1740EL,

TABLE II
SIMULATION RESULT OF OUTPUT CURRENT CHARACTERISTICS

Output Current	Without harmonic injection	Harmonic injection	Proposed topology
Peak Value	3.07710	2.36405	2.22559
Average Value	1.51009	1.52514	1.53343
Peak-to-Average Ratio	2.03769	1.55005	1.45138

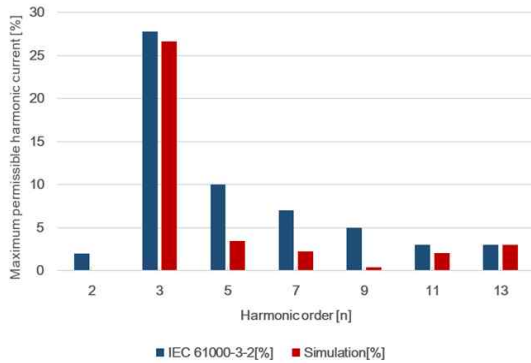


Fig. 7. Harmonic spectrum of input current.

역률 및 고조파 측정은 YOKOGAWA社의 WT1800을 이용하였으며 MCU 제어는 TI(Texas Instruments)의 TMS320F28377을 이용하였다.

그림 8과 그림 9 및 그림 10에 실험 파형을 나타내었다. 시뮬레이션과 마찬가지로 제작된 회로에서 기존의 고조파 주입이 없는 방식, 고조파 주입 방식, 제안된 방식에 따른 입력 전압, 입력 전류, 출력 전류를 측정하였으며, 입력 전압 스케일은 200[V/DIV]이며, 입력 전류 스케일은 0.5[A/DIV], 출력 전류 스케일은 1[A/DIV], 시간 축 스케일은 2[ms/DIV]이다.

각 파형은 시뮬레이션 결과와 거의 유사한 것을 확인할 수 있으며, 그림 10에서 출력 전류의 최저점에서 S_1 이 턴-온하여 방전되는 것을 확인할 수 있다.

제안된 방식에서 역률은 0.92이고 출력 전류의 평균 전류값은 전류의 평균 전류값은 1.539[A], 최대 전류값은 2.282[A]로 3고조파만 주입했을 때의 peak-to-average비인 1.576에 비해 0.094가 줄어든 1.482로 6.34[%] 감소하였다. 표3에 각 방식별 측정값을 나타내었다.

그림 11은 제안된 회로에서의 입력 전류를 IEC 61000-3-2 Class C와 비교한 그래프로서 고조파 성분이 IEC 규격에 적합함을 확인하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 전해 커패시터가 없는 LED 구동용 전원장치의 새로운 구동 방식을 제안하였다. 전원장치의

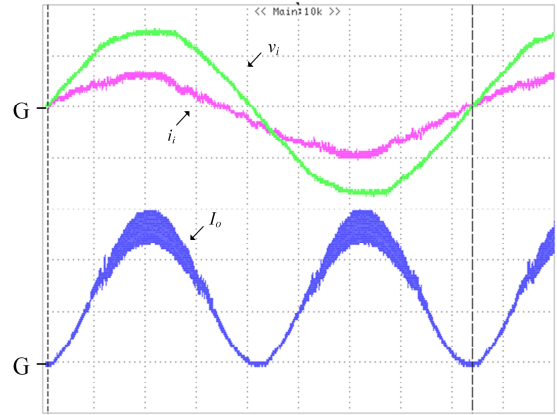


Fig. 8. Experimental output waveform of v_i , i_i , and I_o in case of conventional topology without harmonic injection. (v_i : 200[V/div], i_i : 0.5[A/div], I_o : 1[A/div], 2[ms/div])

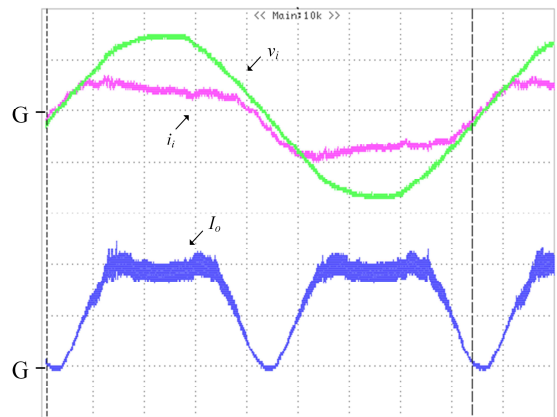


Fig. 9. Experimental output waveform of v_i , i_i , and I_o in case of conventional topology with harmonic injection. (v_i : 200[V/div], i_i : 0.5[A/div], I_o : 1[A/div], 2[ms/div])

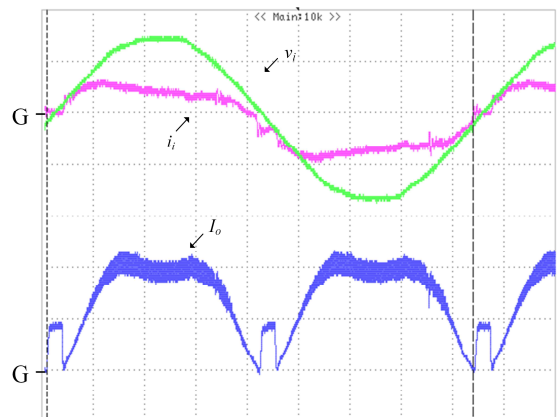


Fig. 10. Experimental output waveform of v_i , i_i , and I_o in case of proposed topology. (v_i : 200[V/div], i_i : 0.5[A/div], I_o : 1[A/div], 2[ms/div])

TABLE III
EXPERIMENTAL RESULT OF OUTPUT CURRENT

Output Current	Without harmonic injection	Harmonic injection	Proposed topology
Peak Value	2.95833	2.41320	2.28167
Average Value	1.52019	1.53121	1.53921
Peak-to-Average Ratio	1.94603	1.57601	1.48236
Power Factor	0.995	0.925	0.921

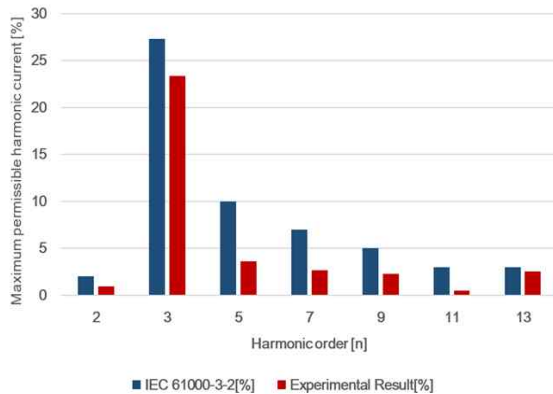


Fig. 11. Experimental harmonic spectrum of input current.

장수명화에 걸림돌이 되는 전해 커패시터를 제거하고, LED 구동 전류의 peak-to-average비를 최소화하기 위하여 입력 전류에 3고조파를 주입하였을 뿐만 아니라 추가된 보조 회로를 통해 출력 전류의 최저점 근처에서 적절한 전류를 추가할 수 있는 방식을 제안하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 보조 회로 스위치의 동작을 확인하였으며 기존 single-stage 방식에서 3고조파만 주입하였을 경우보다도 peak-to-average비가 6.34[%]감소하였음을 확인하였다. 역률은 0.9 이상인 0.92를 얻었고 입력 전류의 고조파는 IEC 61000-3-2 Class C 기준을 만족하는 것을 확인하였다. 제안된 구동 방식은 출력 전류의 최대값을 감소시키고 평균 전류값은 증가시켜, LED에 과도한 전류 스트레스를 줄임으로서 신뢰도를 높였으며 전해 커패시터를 제거함으로써 LED 조명의 장수명을 확보하는데 기여할 것으로 기대된다.

본 연구는 산업통상자원부 수송기기 특화조명 핵심기술개발 전문인력양성사업(과제번호 : N0001363, 조선·해양플랜트·해양환경 LED융합 조명 핵심기술개발 전문인력양성)으로 지원된 연구임.

References

- [1] The Export-Import Bank of KOREA, "2020 Bright export industry," Korea Eximbank Overseas Economic Research Institute, 2015.
- [2] KS C 7655:2011R, Electronic control gear for LED modules—Safety and performance requirements
- [3] B. Singh, S. Singh, A. Chandra, and K. Al-Haddad, "Comprehensive study of single-phase AC-DC power factor corrected converters with high-frequency isolation," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, pp. 540–556, Sep. 2011.
- [4] X. Ruan, B. Wang, K. Yao, and S. Wang, "Optimum injected current harmonics to minimize peak-to-average ratio of LED current for electrolytic capacitor-less AC-DC drivers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, p. 1820–1825, Jul. 2011.
- [5] J. S. Kim, D. H. Kim, and J. H. Choi, "Bridgeless AC-DC converter with film capacitor," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 463–464, Jul. 2014.
- [6] Y. S. Jeon, D. L. Jin, J. D. La, and Y. S. Kim, "Study of the elimination of the electrolytic capacitors and reduction of the ripple current on the output node in the one-stage PFC flyback converter for the LED lighting," *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 61, No. 11, pp. 1625–1633, Nov. 2012.
- [7] S. Y. R. Hui and Y. Qin, "General photo-electro-thermal theory for light-emitting diodes systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 24, No. 8, pp. 1967–1976, Aug. 2009.
- [8] S. C. Hsia, M. H. Sheu, and S. Y. La, "Chip implementation of high-efficient light-emitting diode dimming driver for high-power light-emitting diode lighting system," *IET Power Electronics*, pp. 1043–1051, Jun. 2015.
- [9] J. Wei, Z. Yi, L. Wang, L. Liu, H. Wu, G. Wang, and B. Zhang, "White LED light emission as a function of current and junction temperature," *2013 10th China International Forum on Solid State Lighting (ChinaSSL)*, pp. 166–169, 2013.
- [10] H. v. d. Broeck, G. Sauerlander, and M. Wendt, "Power driver topologies and control schemes for LEDs," *APEC 07-Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 1319–1325, 2007.
- [11] G. Spiazzi, S. Buso, and G. Meneghesso, "Analysis of a high-power-factor electronic ballast for high brightness light emitting diodes," *2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1494–1499, 2005.
- [12] B. Wang, X. Ruan, K. Yao, and M. Xu, "A method of reducing the peak-to-average ratio of LED current for electrolytic capacitor-less AC-DC drivers," *IEEE Trans. on Power Elect.*, Vol. 25, No. 3, pp. 592–601, Mar. 2010.



강경숙(姜敬淑)

1977년 6월 21일생. 2000년 부경대 전기제어공학부 졸업. 2016년~현재 동 과학기술융합전문대학원 LED융합공학 석사과정.



박권식(朴權植)

1991년 11월 19일생. 2017년 부경대 전기공학부 졸업. 2017년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



서병준(徐秉駿)

1991년 10월 23일생. 2017년 부경대 전기공학과 졸업. 2017년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



노의철(魯義哲)

1960년 8월 2일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(공학박사). 1997년~1998년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 방문교수. 2005년~2006년 미국 University of California-Irvine 방문교수. 1995년~현재 부경대 전기공학과 교수. 당 학회 회장.