

연속모드 단일단 PFC 플라이백 컨버터의 연구

Study of Single Stage PFC CCM Flyback Converter

나재두*

Jae Du La*

Abstract

Many industrial regions has used and extended the application of LED driver because of many advantage. Specially, due to the simplicity, miniaturization and power density, the flyback converter is selected by a lot of power engineer. Also, the electrolytic capacitor in this converter is used for the constant DC voltage of the converter because of the sufficient capacitance and the economic price. However, because of the characteristics of the electrolytic capacitor and ripple currents on the converter, the expected lifetime of the LED driver is more and more shorted. In this paper, a single-stage CCM PFC flyback converter with the film capacitor is suggested to extended the lifetime of the LED driver. In addition, the proposed converter with the LC filter is decreased the ripple current of the converter output.

요약

LED 조명은 많은 장점으로 인하여 다양한 분야에서 사용이 점점 증가되고 있다. 특히 플라이백 컨버터는 전력밀도와 구조적 단순성 그리고 소형화가 가능하여 많은 컨버터 설계자들에게 LED 조명용 드라이버로 선택되어지고 있다. 또한 컨버터의 직류출력전압을 안정화하기 위하여 저렴한 가격의 정전용량이 큰 전해커패시터를 사용한다. 전해 커패시터를 갖는 전력변환기를 LED 조명시스템에 적용할 경우에 일반적으로 LED의 수명이 짧아지는 결과를 가져온다. 제안하는 논문은 LED 수명연장과 컨버터 출력리플을 감소시키기 위하여 소용량의 필름 커패시터 LC 필터를 컨버터에 적용하였다.

Key words : LC resonant filter, Electrolytic capacitor-less, CCM, PFC, Flyback converter, LED

1. 서론

에너지 소비절감 그리고 에너지를 사용의 효율화를 위하여 긴 수명과 환경 친화적 그리고 고효율의 LED 구동 드라이버에 대한 연구가 지속적으로 전개되고 있다. LED 조명은 주거, 신호체계, 교통수단 및 의학 분야 등에 적용되면서 적용범위가 점차적으로 매우 넓어지고 있다[1, 2].

LED는 직류전류로 구동하며 교류 전원을 사용할

경우 직류로 변환해주는 회로가 필요하며 스위칭 모드 컨버터가 주로 적용된다. 조명용 컨버터는 역률과 전고조파 왜곡율을 규정한 IEC 61000-3-2의 조건을 만족해야 한다[3-5].

LED 조명을 구동하기 위한 AC-DC 컨버터에는 이단 컨버터(two-stage converter)와 단일단 컨버터(Single-stage converter)가 있다. 이단 컨버터는 역률 보정과 컨버터 출력을 조절하는 부분으로 나눈다. 따라서 각 부분의 회로의 최적화와 출력리플

* Dept. of Electrical Information, Inha Technical College

★ Corresponding author

E-mail : jdna@inhatic.ac.kr, Tel : +82-32-870-2195

※ Acknowledgment

Manuscript received Jun. 3, 2019; revised Jun. 12, 2019; accepted Jun. 20, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

을 감소하여 다양한 부하에 적용이 가능하다, 그러나 스위칭 소자 및 수동소자의 부품수가 많고 각 회로부분을 제어하는 제어회로가 독립적으로 필요하여 경제성이 떨어지며 시스템의 사이즈 및 효율이 낮아지는 단점이 발생한다. 반면에 단일단 컨버터의 경우 스위칭 소자 및 제어회로 개수가 줄어들어 경제적이며 시스템이 간단하여 효율의 향상도 가져올 수 있다.

전원공급기 시스템의 안정성을 위하여 일반적으로 절연형 컨버터를 많이 적용하며 컨버터의 제어모드 중에 경계전도모드(Boundary Conduction Mode)와 불연속전도모드(Discontinuous Conduction Mode)는 입력전류의 피크치가 입력전압을 추종하기 때문에 제어는 간단하나 피크 입력 전류의 크기가 평균 입력전류의 두 배 이상 값을 갖기 때문에 상당히 큰 전류 스트레스가 스위칭 소자에 인가된다. 하지만 연속전도모드(Continuous Conduction Mode)에서는 구동 드라이버의 입력전류가 입력전압을 추종하기 위한 제어가 필수적이다. 단, 제어가 다소 복잡하지만 피크 입력 전류의 값이 낮아지며 스위칭 소자의 스트레스가 적은 장점이 있다[6-8].

대다수의 컨버터는 출력의 안정적 공급을 위하여 대용량의 전해커패시터를 사용한다. 전해커패시터는 가격이 저렴하고 상대적으로 용량이 큰 장점을 갖고 있지만 LED의 수명과 비교하면 단 수명으로 실제 LED 구동 드라이버의 수명을 단축시키면서 오히려 비용적인 문제를 발생시킨다[9]. 그러므로 LED 구동 드라이버의 장시간의 수명연장을 위하여 필름 커패시터를 적용할 수 있다. 비록 필름 커패시터의 가격적인 문제가 발생하나 LED 구동 드라이버의 장기간의 수명연장을 고려하면 오히려 경제적이다. 또한 필름 커패시터의 경우 LED 조명이 사용되는 환경조건에서 전해 커패시터보다 필름 커패시터는 긴 수명을 갖는 장점이 있다. LED 조명은 상당한 발열문제가 있어 대부분 방습 및 방진을 위하여 LED 구동 드라이버를 몰딩한다. 그러므로 LED의 수명연장을 위하여 필름 커패시터를 적용하는 것이 효율적이다[10].

제안하는 논문은 단일단 CCM PFC 플라이백 컨버터의 출력단에 소용량의 필름 커패시터와 인덕터로 LC 공진필터를 구성하여 LED 구동 드라이버의 수명을 연장시키고 출력단에서 120[Hz] 출력리플을 감소시키는 전원회로를 제안하여 타당성과 경제

성을 검증하였다.

II. 본론

1. 제안하는 CCM PFC 플라이백 컨버터

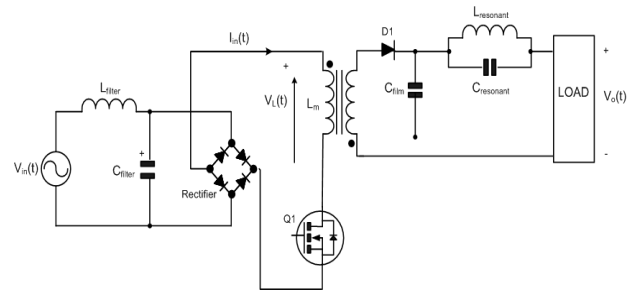


Fig. 1. The proposed single stage CCM PFC flyback converter.
그림 1. 제안하는 단일단 CCM PFC 플라이백 컨버터

그림 1은 제안하는 단일단 CCM PFC 플라이백 컨버터를 나타낸다. 단일단 컨버터의 경우 이단의 컨버터보다 스위칭 소자에 인가되는 전압 스트레스가 훨씬 높다는 단점이 존재하지만 상대적으로 부품수가 적고 절연이 가능하며 다수의 출력을 얻을 수 있고 출력단에 필터로 인덕터를 적용하지 않아도 되는 장점이 있다.

또한 추가적으로 역률 보정을 위하여 BCM, DCM 또는 CCM의 제어모드를 선택하여 컨버터에 적용될 수 있다. DCM 제어모드의 경우 스위칭 소자의 전도 소실과 출력 커패시터의 전류 스트레스가 증가하는 단점이 있다. 또한 BCM의 경우 스위칭소자와 출력 다이오드에 높은 피크 전류가 발생하는 단점이 존재한다. BCM의 경우 효율이 상대적으로 DCM보다 좋지만 역률과 고조파 왜곡율이 낮다. 또한 운전특성이 가변부하에 좌우되며 가변 주파수로 구동드라이버가 동작하므로 입력 필터의 설계가 번거로운 단점이 있다. DCM의 경우 역률과 전고조파 왜곡율이 좋으나 효율이 낮은 단점이 있다. 그러나 CCM의 경우 BCM 또는 DCM의 경우보다 피크전류 및 등가의 실효전류가 작은 값을 갖는 장점이 있으며 또한 입출력 전압이득이 부하조건에 좌우되는 것이 아니라 시비율에 좌우되어 상대적으로 설계과정이 용이하다.

그림 2는 CCM PFC 플라이백 컨버터의 이론적인 PFC 파형으로 히스테리시스 제어의 특성을 보여준다. 또한 그림 3은 제안하는 LED 구동 드라이버의 제어기 블록도이다. 히스테리시스 밴드 폭은

상위 히스테리시스 밴드 폭(H_{ref}) 및 하위 히스테리시스 밴드 폭(L_{ref})으로 나눈다. 제어되어 지는 전류가 상위 히스테리시스 폭(H_{ref})에 접근하면 스위칭 소자는 오프(OFF) 되고 하위 히스테리시스 밴드 폭(L_{ref})에 접근하면 스위칭 소자는 온(ON)이 된다. 그러므로 항상 구동 드라이버의 전류는 히스테리시스 밴드 폭 내에서 피크 값을 초과하지 않고 존재하게 된다. 이러한 히스테리시스 제어 방식은 가변 스위칭주파수를 갖으며 이러한 특징 때문에 적합한 밴드 폭이 설정되어야 한다[14].

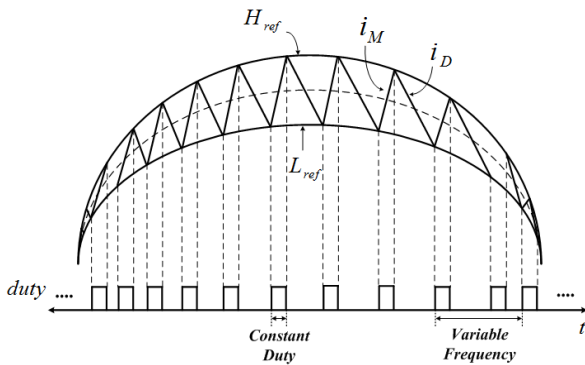


Fig. 2. Theoretical PFC waveform of CCM flyback converter.
그림 2. 이론적인 CCM PFC 플라이백 컨버터의 파형

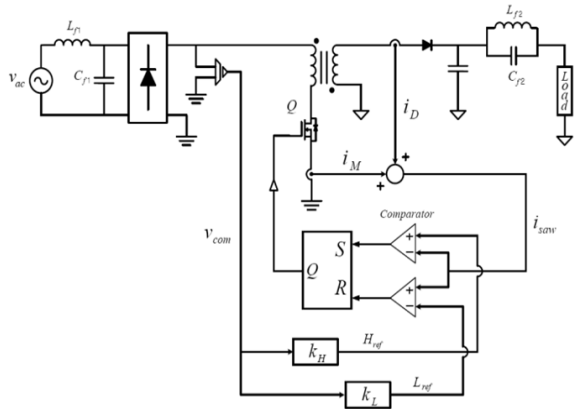


Fig. 3. The proposed block diagram of the PFC control circuit.
그림 3. 제안한 PFC 제어회로의 블록

2. 제안하는 LC 공진필터

LED 구동 드라이버의 수명연장을 위하여 필름 커패시터의 적용은 매우 유용하나 정전용량이 전해 커패시터에 비하여 작기 때문에 안정된 출력을 얻기 어려운 단점과 입력 주파수의 2배에 해당하는 전류리플이 나타난다. 이러한 단점을 제거하기 위하여 구동드라이버에 LC필터를 적용하였다.

필터 모델링을 위하여 LED는 등가회로로 표현하고 AC 모델링을 위해 LED부하는 저항 성분으로 표현하였다. 그림 4는 LED의 등가회로 및 AC 모델링의 등가회로이다.

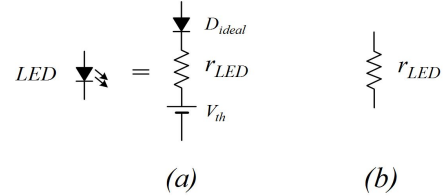


Fig. 4. (a) The equivalent LED lamp circuit
(b) AC LED lamp model

그림 4. (a) LED 램프 등가회로 (b) LED 램프의 AC 모델링

그림 5는 LC 필터를 적용한 경우의 AC 모델링 회로이다. 시스템 각 부품의 기생 저항 성분dp 대한 전류 리플 저감에 대한 영향을 보기 위하여 전달함수를 계산하였다.

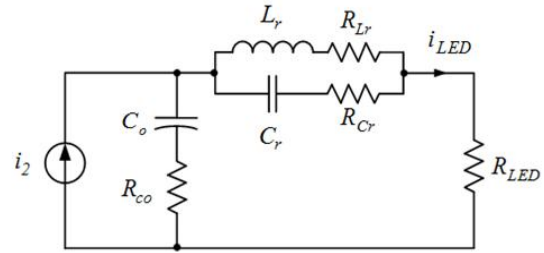


Fig. 5. The proposed LC filter AC modeling at secondary side.

그림 5. 제안하는 LC 필터의 2차측 AC 모델링

그림 5는 구동 드라이버의 2차측에서의 LC 필터 회로를 i_2 와 i_{LED} 의 전달함수를 실제적인 경우와 이상적인 경우로 구하여 식 (1)과 같이 표현하였다.

$$T_{ideal_parallel} = \frac{s^2 L_r C_r + 1}{s^3 L_r C_r C_o r_{LED} + s^2 L_r C_r + s(C_r + C_o)r_{LED} + 1}$$

$$T_{artual_parallel} = \frac{a_6 s^3 + a_5 s^2 + a_4 s + 1}{b_6 s^3 + b_5 s^2 + b_4 s + 1} \tag{1}$$

여기서,

$$a_4 = C_r (R_{Cr} + R_{Lr})$$

$$a_5 = C_r \{L_r + R_{Co} C_o (R_{Cr} + R_{Lr})\}$$

$$a_6 = L_r C_r C_o R_{Co}$$

$$b_4 = C_r (R_{Cr} + R_{Lr} + r_{LED}) + C_o (R_{Co} + r_{LED}) 4$$

$$b_5 = C_r \{L_r + C_o r_{LED} (R_{Cr} + R_{Lr})\}$$

$$+ C_r C_o R_{Co} (R_{Cr} + R_{Lr} + r_{LED})$$

$$b_6 = L_r C_r C_o (R_{Co} + r_{LED}) \tag{2}$$

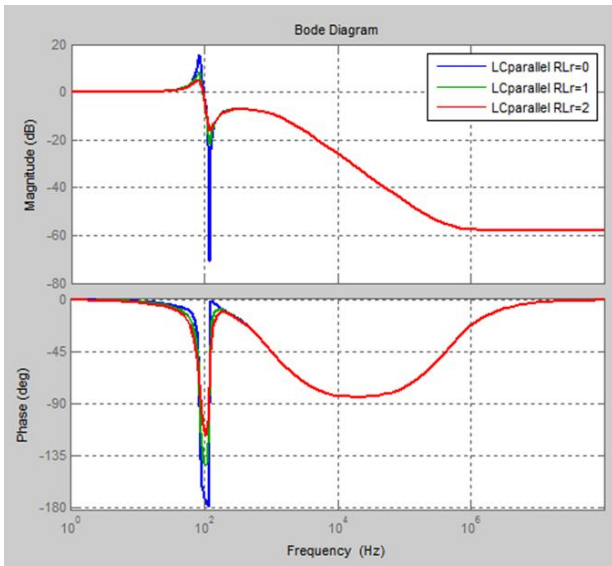


Fig. 6. The proposed LC filter bode-plot.
그림 6. 제안한 LC 필터의 보드선도

식 (1)의 전달함수의 보드선도는 그림 6과 같다. 그림 6의 보드선도는 이상적인 상태에서 120[Hz]에서 약 -70.5[dB], 저항성분이 1[Ω]에서는 약 -21.9 [dB], 2[Ω]에서는 약 -16.23[dB]로 나타나며 제안한 LC 필터가 LED 구동 드라이버에 많은 성능 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

3. 시스템의 구성 및 실험 결과

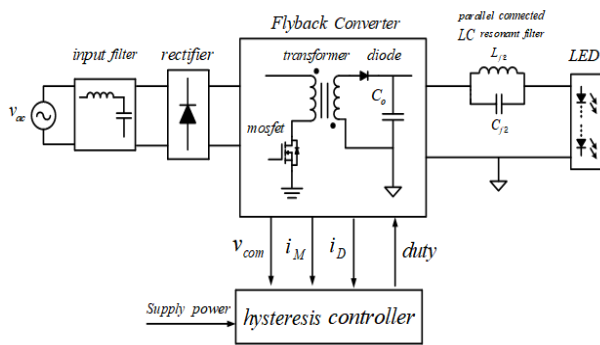


Fig. 7. The proposed single-stage CCM PFC flyback converter with hysteresis controller.

그림 7. 제안하는 히스테리시스 제어기를 갖는 단일단 CCM PFC 플라이백 컨버터

그림 7의 제안한 150[W]급의 PFC 기능을 갖는 CCM 플라이백컨버터로 2차측에 LC 필터를 적용하였다. 또한 컨버터의 120[Hz] 출력 리플이 나타나므로 출력리플을 저감하기 위하여 LC공진필터를 컨버터의 출력부에 적용하였다. 컨버터의 부하는 가로등 및 무대조명에 사용되는 LED를 부하로 선

정하였다. 또한 정격전류 2.7[A], 정격전압 58[V]인 LED 모듈을 부하로 사용하였다.

Table 1. Parameter of the proposed converter.

표 1. 제안하는 컨버터의 파라미터

Parameter	Value
Switching frequency	variable frequency
Input filter inductor	660(uH)
Input filter capacitor	100(nF)
Magnetizing inductor of transformer	1.8(mH)
Turns ratio of transformer	0.42
LC resonant filter capacitor	110(nF)
LC resonant filter inductor	16(mH)
Parasitic resistor of LC filter inductor	1.2(ohm)
Parasitic resistor of LC filter capacitor	3.5(m ohm)
Output capacitor	110(uF)
Parasitic resistor of output capacitor	3.5(m ohm)
Gain of hysteresis high reference band	1.2
Gain of hysteresis low reference band	0.8
Gain of switch current of primary side	4.4
Gain of switch current of secondary side	2.8

PFC 제어를 위하여 구현의 용이성이 있는 히스테리시스 전류 제어를 사용하였다. 표 1은 제안하는 LED 구동 드라이버의 파라미터 표이다.

그림 8은 전 부하에서 LC 필터를 갖는 컨버터의 입력 전압 및 입력전류에 대한 파형을 나타내고 있다. 역률은 약 98[%]로 되는 것을 확인하였고, 컨버터의 입력 실효 전류값 및 전압은 0.773[mA] 및 215[V]였다.

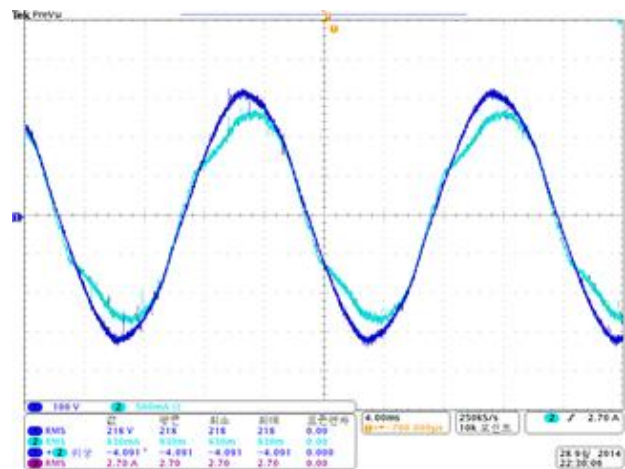


Fig. 8. Experimental waveforms with the LC filter.

그림 8. LC필터 적용시의 실험파형

(1: Input Voltage(100V/div), 2: Input Current(A/div))

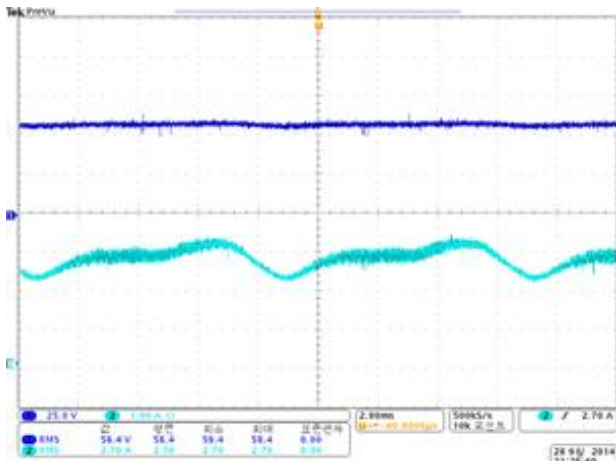


Fig. 9. Experimental waveforms with the LC filter under full load.

그림 9. 전 부하에서의 LC필터 적용시의 실험파형 (CH1: LED voltage(25V/div), CH2: LED current(1A/div))

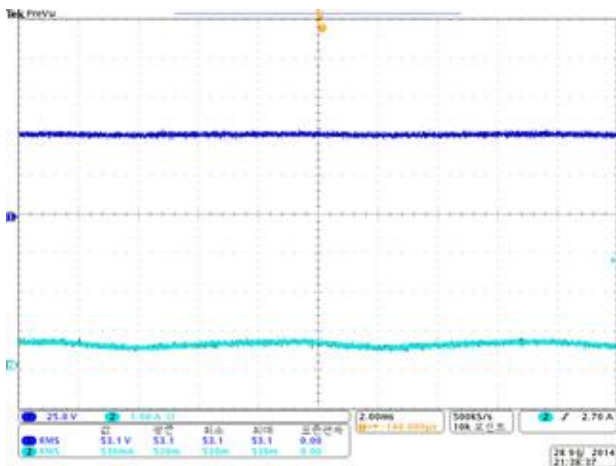


Fig. 10. Experimental waveforms with the LC filter under 50% load.

그림 10. 50% 부하에서의 LC필터 적용시의 실험파형 (CH1: LED voltage(25V/div), CH2: LED current(1A/div))

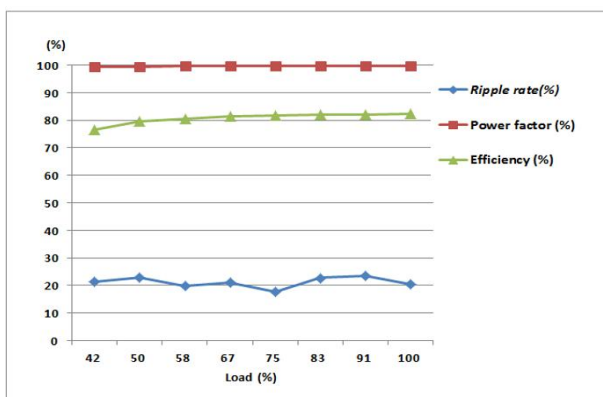


Fig. 11. The input current ripple rate, power factor and efficiency of the proposed converter.

그림 11. 제안한 컨버터의 리플율, 역률, 효율 그래프

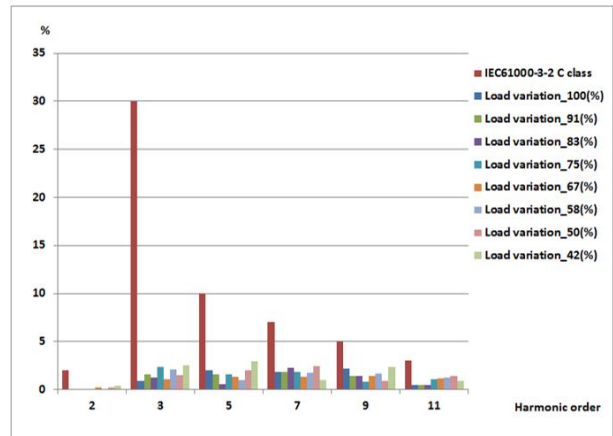


Fig. 12. The input current harmonics spectrum of the proposed converter.

그림 12. 제안한 컨버터의 입력 전류 고조파 그래프

전 부하에서의 실험 파형은 그림 9와 50[%]에서의 실험파형은 그림 10에 나타나있다. 그림 9에서는 LED 평균전류가 2.7[A], 리플율 30[%]였고 그림 10에서는 LED의 평균 전류는 0.54[A], 리플율 14[%]였다.

또한 그림 11은 LC 필터를 적용한 컨버터의 부하율에 따른 리플율, 역률 및 효율 그래프이다. 또한 그림 12은 부하율에 따른 전고조파 왜곡율의 그래프로서 IEC 61000-3-2 Class를 만족한다.

III. 결론

본 논문에서는 LED 램프를 위한 연속모드를 갖는 단일단 PFC 플라이백 전원공급기를 제안하였다. 기존의 전해 커패시터를 필름 커패시터로 대체하여 LED 드라이버 수명을 연장시키고 안정적인 컨버터 출력을 위하여 LC 공진 필터를 적용하였다. 실험결과 제안한 플라이백 컨버터는 98[%] 이상의 역률을 나타내었다, 그러므로 제안한 LC 공진필터를 갖는 플라이백 컨버터는 기존의 수명이 짧은 전해커패시터를 대체할 수 있으며 추가적인 역률 보정회로 없이 연속 모드로 설계하여 간단한 제어로 역률보정이 가능하다. 또한 스위치 없이 스위치 하나로 컨버터를 구현의 단순성이 구현 될 수 있다.

References

- [1] Hongbo Ma, Yuan Li, Qiang Chen, Lanhua Zhang, Jianping Xu, "A Single-Stage Integrated Boost-LLC AC-DC Converter With Quasi-Constant Bus Voltage for Multichannel LED Street-Lighting Applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol.6, Issue.3, pp.1143-1153, 2018.
DOI: 10.1109/JESTPE.2018.2847327
- [2] Cassio Gobbato, Samuel Valerio Kohler, Ithalo Hespanhol de Souza, Gustavo Weber Denardin, "Integrated Topology of DC-DC Converter for LED Street Lighting System Based on Modular Drivers," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.54, Issue.4, pp.3881-3889, 2018.
DOI: 10.1109/TIA.2018.2808905
- [3] Ashish Shrivastava, Bhim Singh, Somnath Pal, "A Novel Wall-Switched Step-Dimming Concept in LED Lighting Systems Using PFC Zeta Converter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.62, Issue.10, pp.6272-6283, 2015.
DOI: 10.1109/TIE.2015.2416338
- [4] IEC Std. 61000-3-2. Electromagnetic compatibility. Part 3 Limits. Section 2 Limits for harmonic current emissions (equipment input current $\leq 16A$ per phase), 1995.
- [5] Amit Agrawal, K. C. Jana, Ashish Shrivastava, "A review of different DC/DC converters for power quality improvement in LED lighting load," *2015 International Conference on Energy Economics and Environment (ICEEE)*, pp.1-6, 2015. DOI: 10.1109/EnergyEconomics.2015.7235089
- [6] Tirthasarathi Lodh, Nataraj Pragallapati, Vivek Agarwal, "Novel Control Scheme for an Interleaved Flyback Converter Based Solar PV Microinverter to Achieve High Efficiency," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.54, Issue.4, pp.3473-3482, 2018.
- [7] Xiaogao Xie, Jian Wang, Chen Zhao, Qiang Lu, Shirong Liu, "A Novel Output Current Estimation and Regulation Circuit for Primary Side Controlled High Power Factor Single-Stage

- Flyback LED Driver," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.27, Issue.11, pp.4602-4612, 2012. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2190523
- [8] Mingzhi Gao, Min Chen, Chi Zhang, Zhaoming Qian, "Analysis and Implementation of an Improved Flyback Inverter for Photovoltaic AC Module Applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.29, Issue.7, pp.3428-3444, 2014.
DOI: 10.1109/TPEL.2013.2279266
- [9] Yajie Qiu, Laili Wang, Hongliang Wang, Yan-Fei Liu, Paresh C. Sen, "Bipolar Ripple Cancellation Method to Achieve Single-Stage Electrolytic-Capacitor-Less High-Power LED Driver," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol.3, Issue.3, pp.698-713, 2015.
DOI: 10.1109/JESTPE.2015.2433918
- [10] Hao Wu, Siu-Chung Wong, Chi K. Tse, S. Y. Ron Hui, Qianhong Chen, "Single-Phase LED Drivers With Minimal Power Processing, Constant Output Current, Input Power Factor Correction, and Without Electrolytic Capacitor," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.33, Issue.7, pp.6159-6170, 2018.
DOI: 10.1109/TPEL.2017.2739125

BIOGRAPHY

Jae Du La (Member)



1994 : BS degree in Electrical Engineering, Incheon National University.

1996 : MS degree in Electrical Engineering, Inah University.

2008 : PhD degree in Electrical Engineering, The University of Birmingham.

2008~ : Professor, Dept. of Electrical Information, Inha Technical College