

파워 LED 시스템 성능개선을 위한 DC/DC 컨버터에 관한 연구

A Study on the DC to DC Converter to Improve the Performance of Power LED System

김영태¹ · 김세윤^{2*}

Young Tae Kim and Sei Yoon Kim

Received: 07 Nov. 2022 Accepted: 11 Nov. 2022

Key Words : Power LED system(파워 LED 시스템), 3-Terminal PWM cell(3단자 PWM 셀), Self Tunning Regulator(자기 동조 제어기), Minimum variance control(최소 분산 제어)

Abstract: In this paper, a DC converter to improve the performance of Power LED system is discussed. The mathematical model of PWM converter power stage using 3-Terminal PWM cell is introduced for power LED system. A controller for DC converter system is used as a self-tuning regulator with a recursive least-squares algorithm. Minimum variance control method is used as a control law. Experiment results verified that proposed control system could improve the performance of Power LED system.

기호 설명

λ : forgetting factor

V_i : input voltage

V_o : output voltage

D : duty

$\hat{d}, \hat{i}, \hat{v}_{ap}, \hat{v}_o$: perturbation

$G_{dv}(s)$: control transfer function

$u(t)$: system input

$y(t)$: system output

$y_{ref}(t)$: reference value

$J(u, t)$: evaluation function

$E\{\cdot\}$: expectation

$v_e(t)$: error compensation function

ρ_v, ρ_u : weighting factor

a_1, a_2, b_0, b_1 : system parameter

1. 서론

최근, 기후변화 같은 환경문제 해결방안과 관련하여 다양한 분야에서 다양한 노력이 이루어지고 있으며, 이 중 신재생에너지 개발 및 에너지 절약에 관한 연구 역시 활발히 진행되고 있다. 특히, 조명 분야에서는 에너지 절약을 위해 기존 조명을 낮은 전력 소모와 긴 수명의 장점이 있는 LED로 교체하고 있으며, 광속과 용량이 크에도 순방향전압(V_F)이 낮은 파워 LED에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, 파워 LED는 빛의 조도, 휘도, 파장 등 여러 부분을 제어할 수 있어 감성 조명, 디스플레이 등 그 응용 분야가 확대되고 있다.

파워 LED의 정전류 구동을 위한 DC/DC 컨버터로는 벡, 부스트, 벡-부스트 방식뿐만 아니라 플리이백, LLC 방식 등 다양한 DC/DC 컨버터가 이용되고 있다.^{1,2)} 이 중 부스트 방식의 DC/DC 컨버터는 입력 전원에 있어서 자유롭고 스위칭 트랜지스터가 접지와 연결되어 스위칭 트랜지스터 구동 회로가 간단하다. 그러나 우반면에 존재하는 영점의 존재로 인해 피드백 루프의 안정성을 위한 보상이 어렵고 부하인

* Corresponding author: seiyoona@gwnu.ac.kr

1 Department of Electrical Engineering, Gangneung-Wonju National University, Wonju, Korea

2 Department of Automotive Engineering, Gangneung-Wonju National University, Wonju, Korea

Copyright © 2022, KSFC

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.

파워 LED의 열화 특성에 의한 전압-전류 특성의 비선형 특성^{3),4),5)} 때문에 시스템의 제어 회로 설계가 어렵기 때문에 강인한 제어 성능을 가지는 제어기가 필요하다.^{6),7),8)}

본 논문에서는 파워 LED의 정전류 구동을 위해 부스트 방식의 DC/DC 컨버터를 이용하고 스스로 시스템 특성 식을 변화시켜 출력을 변화된 환경에 적응시키는 적응제어 방식 중 최소 분산 제어(minimum variance control) 방식을 이용한 자기동조 제어기(Self-tuning Regulator)를 설계하고 실험을 통해 파워 LED 시스템 성능을 확인한다.

2. 수학적 모델

시스템의 특성 해석을 위해 부스터 방식의 DC/DC 컨버터(이하 부스트 컨버터)의 비선형적 스위칭 동작을 한 주기 동안 on, off 동작의 평균화 된 동작으로 선형화시킨 등가 모델인 PWM(Pulse Width Modulation) three-terminal 스위치 모델을 이용하여 해석한다.⁹⁾ Fig. 1은 PWM 스위치 셀에 대한 PWM three-terminal 스위치 모델을 나타낸다.

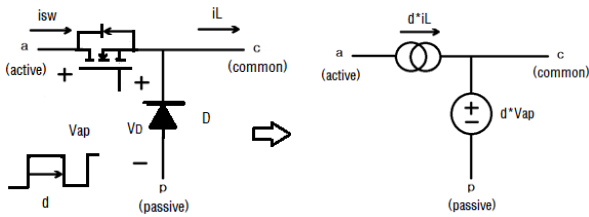


Fig. 1 PWM three-terminal switch model

2.1 정상상태 해석

Fig. 2는 정상상태 해석을 위해 PWM three-terminal 스위치 모델을 적용한 등가회로를 나타낸다.

정상상태에서 인덕터는 단락이고, 캐패시터가 개방이므로 입출력 관계식은 식 (1)과 같다.

$$V_o = \frac{1}{(1-D)} V_i \quad (1)$$

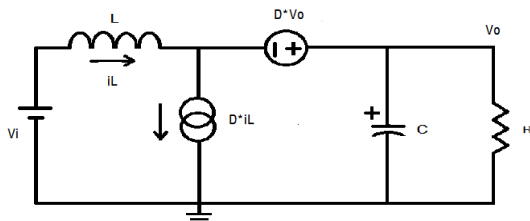


Fig. 2 Steady-State equivalent Circuit of Boost Converter

2.2 소신호 해석

소신호 해석에서 변수들은 DC 성분과 소신호 성분의 합으로 표현되므로 변수들의 곱인 $d \cdot i_L$ 과 $d \cdot v_{ap}$ 도 각각 소신호 성분과 DC 성분으로 구성되며 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} d \cdot i_L &= \hat{d} \cdot I_L + D \cdot \hat{i} + D \cdot I_L + \hat{d} \cdot \hat{i} \\ d \cdot v_{ap} &= \hat{d} \cdot V_{ap} + D \cdot \hat{v}_{ap} + D \cdot I_L + \hat{d} \cdot \hat{v}_{ap} \end{aligned} \quad (2)$$

입력전압은 일정하다고 가정하고 $\hat{d} \cdot \hat{i}$ 항과 $\hat{d} \cdot \hat{v}_{ap}$ 항은 매우 작은 값이라 무시할 수 있으며 $v_{ap} = -v_o$ 이므로 PWM three-terminal switch model을 이용한 부스트 컨버터의 소신호 등가회로를 나타내면 Fig. 3과 같다.

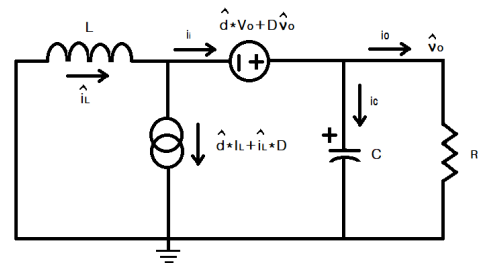


Fig. 3 Small-signal equivalent Circuit of Boost Converter

Fig. 3에서 회로 방정식을 구하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} L \frac{d\hat{i}_L}{dt} &= \hat{d} V_o + D \hat{V}_o - \hat{v}_o \\ \hat{v}_o &= \frac{1}{C} \int i_c dt \\ i_c &= i_i - i_o \\ i_o &= \frac{\hat{v}_o}{R} \end{aligned} \quad (3)$$

라플라스 변환을 이용하여 식 (3)에서 제어 전달함수 $G_{dv}(s)$ 를 구하면 식 (4)와 같다. 식 (4)에서 알 수 있듯이 부스트 컨버터는 우반면에 영점이 존재하고 부하 변화에도 영향을 받음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} G_{dv}(s) &= \frac{\hat{v}_o}{\hat{d}} \\ &= \frac{V_o}{(1-D)} \cdot \frac{(1-s \cdot \frac{L}{R \cdot (1-D)^2})}{1+s \cdot \frac{L}{R \cdot (1-D)^2} + s^2 \cdot \frac{L \cdot C}{(1-D)^2}} \end{aligned} \quad (4)$$

3. 제어기 구성

파워 LED의 정전류 구동을 위해 실제 출력과 기준 출력과의 평균제곱오차(mean square error)를 최소로 하는 제어입력을 구하는 최소 분산 제어 방식과 시스템 매개변수를 추정하는 순환형 최소 자승 추정 기법(recursive least squares algorithm)을 이용한 자기동조 제어기를 설계한다.^{10),11)}

3.1 자기동조 제어기

부스트 컨버터의 제어 전달함수는 식 (4)와 같이 2차 특성이므로 식 (5)와 같은 확률적인 단입력, 단출력 ARMAX(auto regressive moving average model with auxiliary input) 모델로 표현할 수 있다.¹²⁾

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-d}B(q^{-1})u(t)$$

$$\frac{y(t)}{u(t)} = \frac{q^{-1}(b_0 + b_1q^{-1})}{1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2}} \quad (5)$$

여기서, $y(t)$ 와 $u(t)$ 는 시스템의 출력과 입력이고 t ($t=1,2,3, \dots$)는 샘플링 순간, q^{-1} 은 단위 시간 지연 연산자로 $q^{-d}y(t) = y(t-d)$ 가 되며 d ($d \geq 1$, 정수)는 시스템의 시간지연을 나타낸다. 시스템 출력은 식 (6)과 같다.

$$y(t) = -a_1y(t-1) - a_2y(t-2) + b_0u(t-1) + b_1u(t-2) \quad (6)$$

시스템에 적합한 최소분산 제어기 설계를 위해 평가함수를 식 (7)과 같이 정의한다.

$$J(u, t) = E \left\{ \frac{1}{2} [y(t+1) - y_{ref}(t+1)]^2 + \frac{1}{2} \rho_v [v_e(t+1)]^2 + \frac{1}{2} \rho_u [u(t)]^2 \right\} \quad (7)$$

여기서, $E\{\cdot\}$ 는 샘플링 순간 t 에서 얻어진 값에 의한 샘플링 순간 $t+1$ 에서의 기댓값을 나타내고 $y_{ref}(t)$ 는 기준값을 나타낸다. ρ_v , ρ_u 는 가중치이며 $v_e(t)$ 는 입출력 오차를 보상하는 항으로 식 (8)로 표현된다.

$$v_e(t) = v_e(t-1) + e(t)$$

$$e(t) = y_{ref}(t) - y(t) \quad (8)$$

그러므로, 평가함수를 최소화함으로써 시스템 출력과 기준값의 오차를 최소화할 수 있다.

3.2 매개변수 추정

시스템 매개변수를 추정하기 위해 순환형 최소 자승 추정기법을 사용한다. 매개변수 벡터와 입출력 벡터는 식 (9)와 같다.

$$\theta^T(t) = [a_1, a_2, b_0, b_1]$$

$$\phi^T(t) = [-y(t-1), -y(t-2), u(t-1), u(t-2)] \quad (9)$$

미지의 매개변수 θ 는 식 (10)과 같은 순환형 방정식으로부터 구해진다.

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \mu(t)[y(t) - \phi^T(t-1)\hat{\theta}(t-1)]$$

$$\mu(t) = \frac{p(t-1)\phi(t)}{\lambda + \phi^T(t)p(t-1)\phi(t)} \quad (10)$$

$$p(t) = \frac{1}{\lambda} [I - \mu(t)\phi^T(t)]p(t-1)$$

여기서, λ 는 망각인자로 시변시스템의 알고리즘 추정 능력을 높이기 위해 과거의 시스템 입출력 정보들보다 현재의 정보에 가중치를 두기 위한 변수이며, $0 < \lambda \leq 1$ 의 값을 갖는다.

식 (10)에서 구해진 $\hat{\theta}$ 를 이용하여 식 (7)의 평가함수를 최소화하는 제어입력을 구하면 식 (11)과 같이 구해진다.

$$u(t) = \frac{1}{h_0} [f_1y(t) + f_2y(t-1) + g_1u(t-1) + g_2y_{ref}(t) + g_3v_e(t)] \quad (11)$$

여기서

$$h_0 = b_0^2(1 + \rho_v) + \rho_u \quad f_1 = (1 + \rho_v)b_0a_1$$

$$f_2 = (1 + \rho_v)b_0a_2 \quad g_1 = -(1 + \rho_v)b_0b_1$$

$$g_2 = (1 + \rho_v)b_0 \quad g_3 = b_0\rho_v$$

4. 실험 결과

시스템 특성 실험에서 파워 LED는 서울반도체사의 High-Power LED - Z5-M2 ($V_F = 3.0 V @ I_{F, MAX} = 1500 mA$)를 사용하였으며, 기존의 제어기와 STR 제어기를 이용하여 각각 일정 부하 직렬부하와 부하 변동에서 정전류 특성 실험을 수행하였다. Fig. 4는 실험 장치 구성도와 파워 LED 부하의 구성도이다. 전류 센싱은 저항을 이용하였고, 프로세서는 16MHz의 ATmega128을 사용하였다.

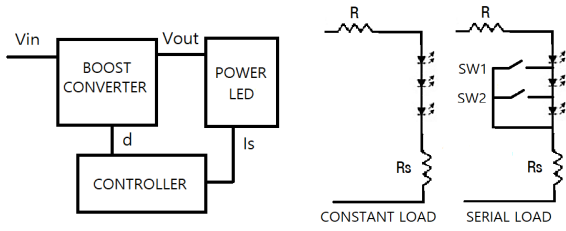


Fig. 4 Configuration of experiment circuit and Load circuit

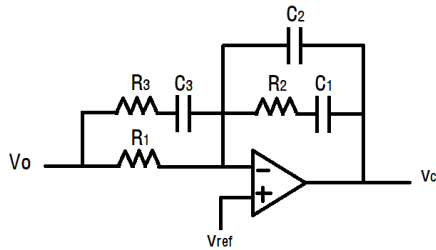


Fig. 5 Traditional control circuit

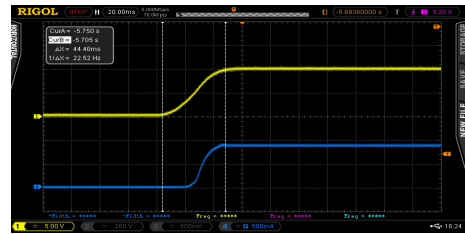
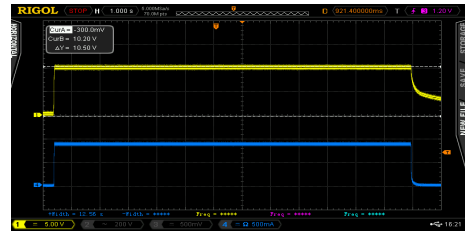
파워 LED 부하에서 전류를 감지한 후 제어기를 통해 정전류 및 부하시험 시 부스트 컨버터의 시비율을 조정함으로써 시스템 특성을 개선한다.

Fig. 5는 기존의 제어 회로를 나타내며, 2개의 영점이 인접해 있어 과도응답 특성이 좋고, 세 번째 극점을 뒹으로써 고주파의 불필요한 성분들을 감쇠시킬 수 있도록 구성하였다. 식 (12)는 제어 회로의 전달 함수이다.

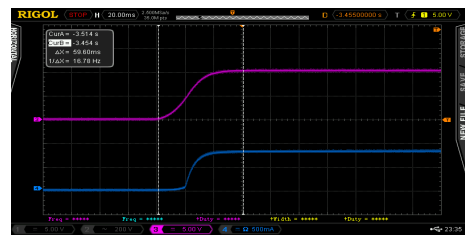
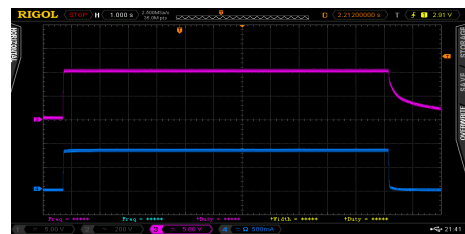
$$\frac{v_c}{v_o} = \frac{(1 + sC_1R_2) \{1 + sC_3(R_1 + R_3)\}}{s(C_1 + C_2)R_1(1 + sC_3R_3) \left(1 + s \frac{C_1C_2R_2}{C_1 + C_2}\right)} \quad (12)$$

Fig. 6은 일정 부하에서 기존방식과 자기 동조 제어 방식의 정전류제어 실험 결과 파형이다. 각각 위 파형은 출력전압 파형이고, 아래 파형은 출력 전류 파형을 나타낸다. 실험 결과로 알 수 있듯이 스위치 on일 때 기존방식의 과도상태 시간이 44.4ms로 자기 동조 제어 방식의 59.6ms보다 다소 빠르나 그 이후 두 방식 모두 10V의 출력전압과 800mA의 출력전류를 일정하게 유지하며 동작함을 알 수 있다.

Fig. 7은 직렬부하에 대한 부하 변동 실험 결과 파형을 나타낸다. 시스템 시작 후 직렬부하 구성도의 스위치를 SW1, SW2 off → SW1 on, SW2 off → SW1 off, SW2 on → SW1, SW2 → SW1 on, SW2 off 순으로 POWER LED의 직렬 연결 수를 3개 → 1개 → 2개 → 3개 → 1개 순으로 변동하며 부하 변동 실험을 수행하였다.



(a) Traditional Method
(Yellow:Output Voltage, Blue:Output Current)

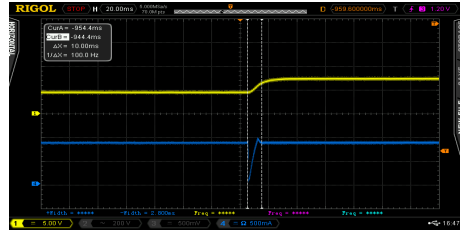
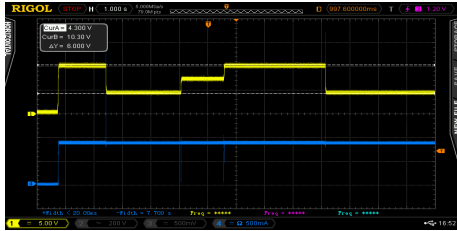
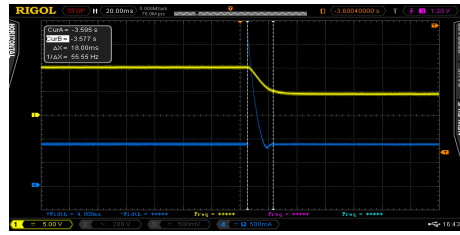
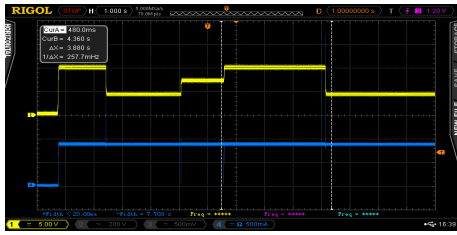


(b) Self Tuning Control Method
(Purple:Output Voltage, Blue:Output Current)

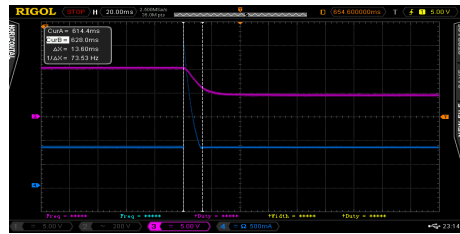
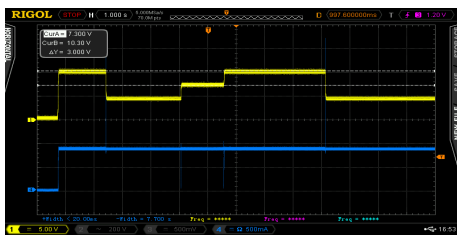
Fig. 6 Constant Load Test

실험 결과에서 알 수 있듯이 기존방식과 자기동조 제어방식 모두 출력전압을 조절하여 부하 변동 때에도 일정 전류제어가 되고 있음을 알 수 있으며, 출력 전압 조절량은 파워 LED의 $V_f(3V)$ 임을 알 수 있다.

Fig. 8는 부하 변동 실험에서 부하 변동 시 과도상태 응답 특성 실험 결과 파형이다. 파워 LED의 직렬 연결 개수가 3개에서 하나로 변동될 때 자기 동조 제어 방식의 경우 과도응답 시간이 13.6ms로 기존방식의 18ms보다 4.4ms 빠르며 파워 LED의 직렬 연결 개수가 1개에서 2개로 변동될 때도 자기 동조 제어방식의 과도응답 시간이 6ms로 기존방식의 10ms보다 4ms 빠름을 알 수 있다. 또한, 두 방식 모

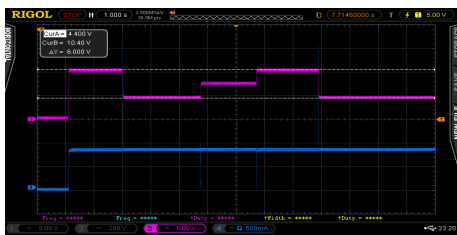
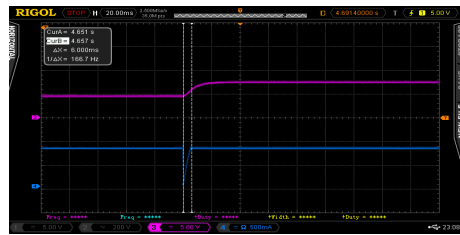
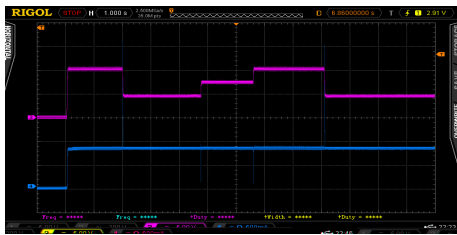


(a) Traditional Method
(Yellow:Output Voltage, Blue:Output Current)

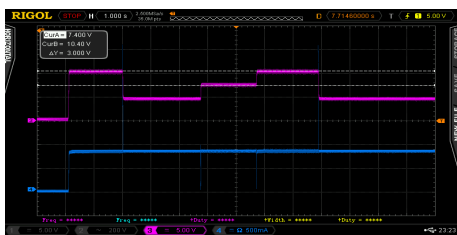


(a) Traditional Method
(Yellow:Output Voltage, Blue:Output Current)

(b) Self Tuning Control Method
(Purple:Output Voltage, Blue:Output Current)
Fig. 8 Transient Response Test



두 부하 변동이 클수록 과도응답 시간이 길어짐을 알 수 있다.



(b) Self Tuning Control Method
(Purple:Output Voltage, Blue:Output Current)
Fig. 7 Load Variation Test

5. 결론

본 연구는 파워 LED 시스템 성능개선을 위한 DC/DC 컨버터 제어에 관한 연구로 일정 부하와 부하 변동에서 정전류 특성 실험을 통해 기존 제어방식과 자기 동조 제어 방식을 비교, 분석하였다.

일정 부하 실험에서 시작 시 기존방식이 자기 동조 제어 방식에 비해 과도응답 시간이 15.2ms 빠르나 이는 자기 동조 제어 방식에서 입력제한 향으로

인한 결과로 분석되며, 정상상태에서는 두 방식 모두 800mA의 정전류제어가 원활히 수행됨을 확인하였다.

부하 변동 실험에서 두 방식 모두 부하 변동에 대응하여 과워 LED의 $V_F(3V)$ 에 해당하는 출력전압 제어를 통해 원활한 일정 전류제어가 되고 있음을 확인하였으나 부하 변동 시 과도응답 특성은 자기 동조 제어 방식이 약 4ms 이상 빠르며, 이러한 과도응답 특성의 차이는 부하 변동이 클수록 그 차이가 벌어질 것으로 생각된다.

연구 결과를 통해 자기 동조 제어 방식은 과워 LED 시스템의 과도응답 특성 개선에 효과적이며, 부하 변동이 심한 과워 LED를 이용한 디스플레이 방면에 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 강릉원주대학교 산업협력단의 지원을 받아 수행된 연구 결과임.

References

- 1) K. Morihori, Y. Ishizuka, H. Matsuo, "Consideration of A Dive Circuit for LED with Constant-Current Control", IEICE Technical Report EE 2004-68(2005-02), pp. 13-19, 2005
- 2) Heinz van der Broeck, Georg Sauerlander, Matthias Wendt, "Power driver topologies and control schemes for LEDs"; Applied Power Electronics Conf.(APEC2007), pp. 1319 - 1325, 2007
- 3) S. Aparnajha, P.Kowsalya, B. Mahalakshmi, P. Sridevi ponmalar, "High efficiency DC-DC Boost converter design for LED drives", IJARIE, Vol3, Issue-2, 2017
- 4) 김희준, "스위츠모드 파워서플라이", 성안당, 2002
- 5) R. Osorio, J. M. Alonso, G. Martinez, N. Vazquez, M. ponce-Silva, A. J. Martinez, " Simplified electrical modelling of power LEDs for DC-DC converter analysis and simulation", International Journal of Circuit Theory and Applications, Vol. 45, Issue 11, pp. 1760-1772, 2017
- 6) J. Y. Huh, "Velocity Control of an Electro-hydraulic Servo System with Integral Variable Structure Controller", Journal of Drive and Control, Vol.18 No.4 pp.52-58, 2021
- 7) J. H. Yoon, J. Y. Park and J. S. Jang, "Disc Displacement Control of the Emergency Shut-Down Valve for LNG Bunkering" Journal of Drive and Control, Vol.18 No.4 pp.28-34, 2021
- 8) J. Y. Huh, "Position Control of an Electro-hydraulic Servo System with Sliding Mode", Journal of Drive and Control, Vol.18 No.3 pp.16-22, 2021
- 9) V. Vorperian, "Simplified Analysis of PWM Converters Using the Model of the PWM Switch : Parts I and II", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 26, No. 2, 1990
- 10) D. W. Clarke and P. J. Gawthrop, "Self tuning control", Proc. IEE, Vol. 126, PP. 630-640, 1979
- 11) Grimble, M., "Generalized Minimum Variance Controller revisited", Optimal Control Application & Methods, Vol. 9, pp. 63-77, 1988
- 12) G. C. Goodwin, K. S. Sin, "Adaptive Filtering Prediction and Control", Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J. 1984