

LED 구동장치용 능동 EMI 필터의 실현

(A Study on the Active EMI Filter for LED Driver)

이동호* · 최민환 · 박종연**

(Dong-Ho Lee · Min-Whan Choi · Chong-Yeun Park)

Abstract

Recently, LED is being used as various applications such as home lightings, work lightings and so on. EMI noise generated from LED driver have become a problem according to increase the use of LED. In this paper, Active EMI filter composed active and passive components is discribed as a method of solving a problem of EMI. The proposed filter is applied to the 160W LED load to verify performance experimentally. To compare the performance, We did an experiment using the proposed filter and the passive filter on the same 160W LED load and Driver System. As a result, The proposed Active EMI filter attenuated Conduction EMI noise better than any existing passive filter.

Key Words : Electromagnetic Interference, Passive EMI Filter, Active EMI Filter

1. 서 론

1.1 연구의 배경

EMI(Electromagnetic Interference) 필터는 전기·전자기기로부터 발생하는 불필요한 전자기 신호 또는 전자기 잡음을 제거해 주는 장치이다. 과거에는 EMI가 크게 문제되지 않았으나 반도체 기술과 정밀 전자기기의 발달로 전자 기기의 사용이 폭발적으로 증가

하게 되면서 이들로부터 발생하는 전자파 장애가 전파 잡음 간섭을 비롯해 정밀 전자 기기의 상호 오동작, 통신 전파감도의 악영향 등 여러 문제를 발생시키게 되면서 중요한 문제가 되었다.

최근 차세대 광원으로써 각광받고 있는 LED(Light Emitting Diode)는 높은 광효율과 공간 활용효율을 나타내고 친환경적이며 긴 수명을 갖는 등의 많은 장점을 갖고 있지만 LED를 구동하기 위한 구동장치를 필요로 하고, 수명이 온도특성에 크게 영향을 받는 등의 문제점을 갖고 있다[3].

특히 LED 구동장치에 주로 사용되는 SMPS(Switching Mode Power Supply)는 높은 효율로 LED 구동이 가능하지만 구동전압을 얻는 과정에서 반도체 소자의 스위칭에 의해 EMI 잡음이 많이 발생하는 문제점을 갖고 있다.

* Main author : Kangwon National University

** Corresponding author : Kangwon National University

Tel : 033-250-6292, Fax : 033-259-5674

E-mail : dh102281@naver.com

Received : 2014. 10. 28

Accepted : 2014. 12. 2

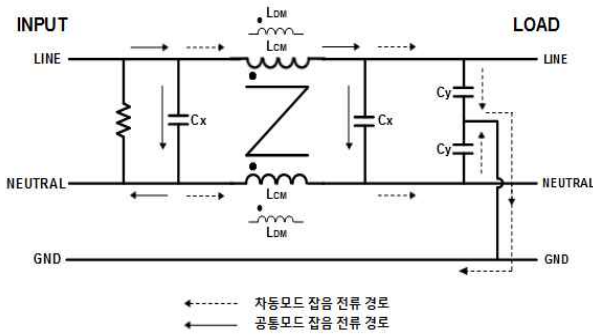


그림 1. 수동 EMI 필터의 회로도
Fig. 1. Circuit of Passive EMI Filter

그림 1은 기존에 EMI의 억제를 위해 가장 많이 사용되고 있는 EMI 필터의 구조이다. 중앙에 위치한 Choke와 전원선로 사이에 삽입되는 X-커패시터, 전원선로와 접지 사이에 삽입되는 Y-커패시터 등 수동 소자들로 구성되어 EMI 잡음을 억제하는 역할을 해왔으나 수동소자 특성상 저주파에서는 높은 삽입손실을 나타내지 못하여 저주파감쇄특성이 미미하고, Choke로 인해 무게가 무겁고 부피가 크다는 단점을 가지고 있다. 수동 EMI 필터의 치명적인 단점 중 하나는 Y-커패시터에 의하여 누설전류가 발생한다는 점이다. Y-커패시터는 Line과 접지, Neutral과 접지사이에 삽입되어 Choke의 누설 인덕턴스와 함께 저역통과 필터로서 공통모드 잡음을 감쇠시키는 역할을 하지만 커패시터의 용량에 비례하여 누설전류가 발생한다. 누설전류를 줄이기 위해서는 Y-커패시터의 커패시턴스를 감소시켜야하며, 이로 인해 큰 인덕턴스를 필요로 하게 되고 결과적으로 필터의 부피가 커지는 문제점을 야기한다[4].

1.2 연구의 목적 및 방법

본 연구에서는 수동 EMI 필터의 단점을 보완하기 위하여 작은 값을 가진 수동 EMI 필터에 반도체소자를 이용한 능동 잡음보상회로를 결합한 능동 EMI 필터를 개발하였다.

능동 EMI 필터는 잡음을 검출하고, 검출된 잡음의 크기에 따라 알맞은 보상신호를 주입함으로써 잡음을

상쇄시키는 원리이다[5-7].

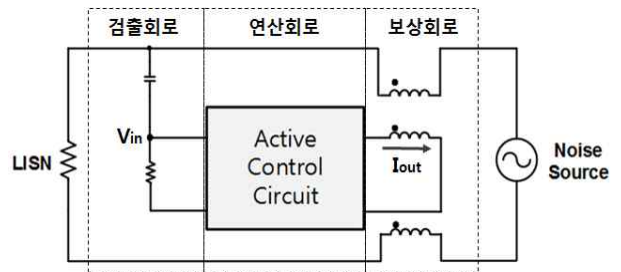


그림 2. 능동 EMI 필터의 구조
Fig. 2. Structure of Active EMI Filter

이 방법은 기존의 수동필터에 비해 잡음감쇄 효율이 높고, 수동필터에서 가장 큰 무게와 부피를 차지하던 Choke를 반도체소자인 OP-Amp로 대체함으로써 LED 구동장치의 크기와 무게를 작고 가볍게 해 줄 수 있다. 또한 누설전류발생의 주요 원인이 되는 Y-커패시터를 사용하지 않기 때문에 누설전류 저감에도 도움이 된다.

본 연구는 능동 EMI 필터를 설계한 뒤 전달함수 유도를 통해 잡음이 상쇄되는 과정을 이론적으로 검증하였고, 제작된 필터를 LISN(Line Impedance Stabilization Network)와 160W LED 구동장치에 삽입하여 스펙트럼 분석기의 출력을 통해 전도성 EMI의 세기를 측정하고, 수동필터와의 삽입손실 비교를 통해 성능을 검증하는 방법으로 이루어졌다.

전도성 잡음 측정범위는 KS C CISPR 15의 규격에 따라 9kHz~30MHz로 결정하였다[2].

2. 능동 EMI 필터 설계방법

2.1 능동 필터의 잡음감쇄대역 설정

그림 3은 스펙트럼 분석기를 통해 160W 정격의 LED 구동장치(SMPS)에서 발생하는 전도성 EMI 잡음을 측정된 파형이다.

LED 구동장치에서 발생하는 잡음의 특성을 분석해보면 기본스위칭 주파수인 250kHz대역에서 가장 큰 잡음(88 dBuV~93dBuV)이 나타났고, 기본스위칭 주

파수의 고조파성분 (500 kHz, 750 kHz, 1 MHz ...)에서 차례대로 잡음이 발생되는 것을 확인하였다.

그림 3에서 나타난 500 kHz 이상의 EMI 잡음은 작은 값의 수동소자를 삽입하여도 주파수가 높아질수록 높은 삽입손실을 나타내는 수동 필터의 특성에 의해 충분한 감쇄를 보일 것으로 판단되었고, 주파수가 높아질수록 능동 필터에 사용되는 OP-Amp의 동작특성이 나빠지는 것을 고려하여 본 연구에서는 기본스위칭 주파수 250kHz를 대상으로 능동 EMI 필터를 설계하였다.

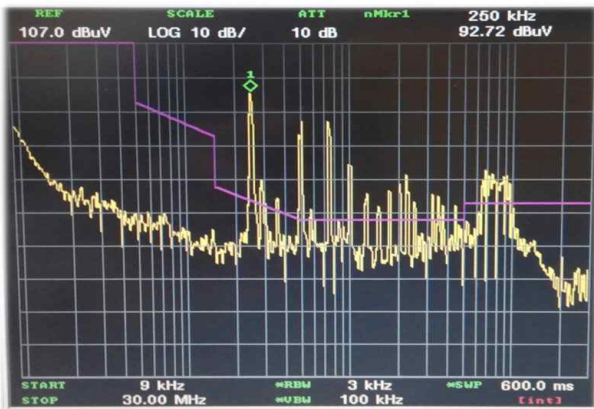


그림 3. LED 구동장치의 EMI 잡음 측정
Fig. 3. EMI Noise Measurement of LED Driver

2.2 능동 필터의 구조와 설계방법

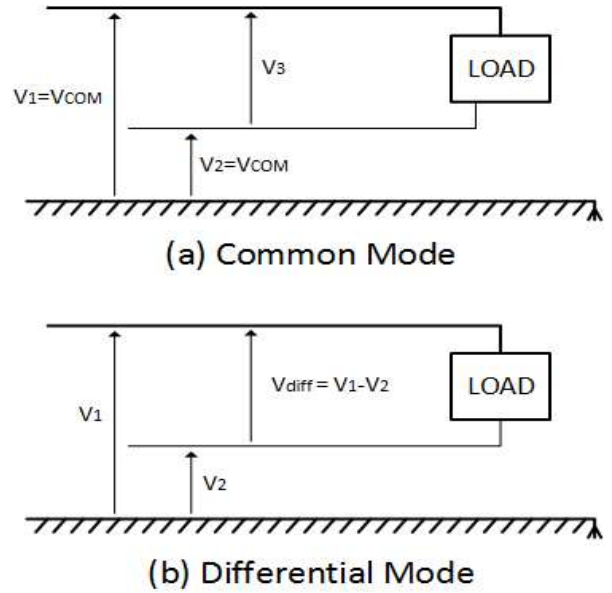


그림 4. 공통모드와 차동모드
Fig. 4. Common Mode and Differential Mode

필터의 구조 결정에 앞서 EMI 잡음의 공통모드와 차동모드에 대한 구분이 필요하다. EMI 잡음은 도선과 접지 사이에 나타나는 공통모드(Common Mode)

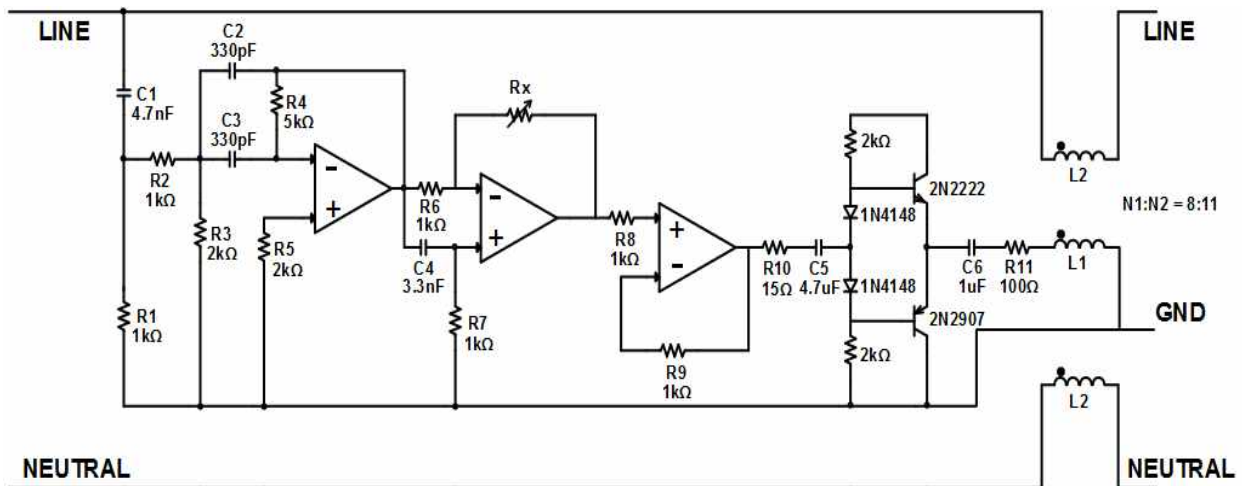


그림 5. 제안된 능동 EMI 필터의 회로도
Fig. 5. Circuit of Proposed Active EMI filter

잡음과 전원선로(Line, Neutral) 사이에 나타나는 차동모드(Differential Mode)잡음으로 구분되며, 각각의 성분에 따라 수동·능동필터의 구성과 설계방법이 다르기 때문에 설계할 필터의 대상 잡음이 공통모드인지 차동모드인지를 구분하는 것은 매우 중요하다[1].

본 연구에서는 공통모드 잡음에 대한 그림 5의 전압 검출 및 전류보상 능동 EMI 필터를 설계하였다.

그림 5는 설계된 필터의 전체 회로도이다. 고역통과 필터를 통해 잡음신호를 검출한 뒤, 250kHz를 중심주파수로 갖도록 설계된 대역통과 필터를 이용하여 고조파와 고주파잡음을 제거하고, 전대역통과필터를 통해 잡음 감쇄효과를 최대로 할 수 있도록 위상을 지연시키는 역할을 한다. 전대역통과필터의 출력신호는 버퍼와 B급 전력증폭기를 거쳐 주입트랜스포머를 통해 전원선로로 주입된다.

필터가 최대의 잡음 감쇄성능을 갖도록 하기위해 검출신호와 주입신호가 역 위상을 갖도록 전대역통과필터를 설계하였다[8].

그림 6은 LED 구동장치를 잡음발생원(V_n)으로, 보상신호를 만들어내는 연산증폭기 회로와 B급 증폭기는 능동제어회로로 등가화한 그림이다.

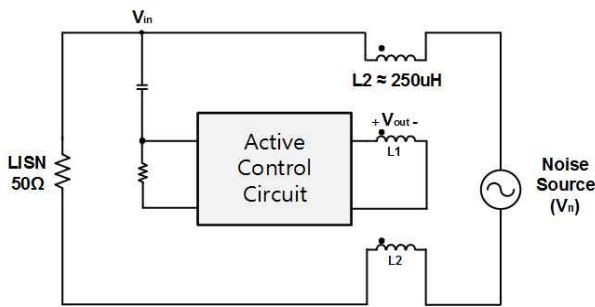


그림 6. LISN과 LED 구동장치의 모델링
Fig. 6. LISN and LED Driver Modelling

능동 EMI 필터의 보상신호가 잡음신호와 같은 진폭을 갖도록 하기위한 필터의 이득결정 방법은 다음과 같다. 주입트랜스포머의 2차측 L_2 는 약 250uH의 인덕턴스를 가지며, SMPS의 스위칭주파수(EMI 잡음의 기본주파수)인 250kHz에서 약 400Ω의 임피던스를 갖는다. LISN의 임피던스가 50Ω으로 일정하다 가정할

때, 전압분배의 법칙에 따라 필터의 검출회로에 입력되는 전압 V_{in} 은 V_n 의 1/8~1/9 정도가 된다. 따라서 능동 EMI 필터의 보상신호가 잡음신호와 같은 진폭을 갖기 위해서는 능동제어회로가 약 8~9배의 이득을 갖도록 설계해야한다.

3. 전달함수유도를 통한 이론적 검증

3.1 1Pole로 가정한 OP-Amp의 전달함수

이상적인 OP-Amp와 달리 실제 OP-Amp는 주파수에 따라 이득·위상지연 특성이 변화한다. 보다 정확한 전달함수 유도를 위해 실제필터에 사용된 OP-Amp소자 SN10503의 전달함수를 유도하였다[9].

그림 7에서 나타내는 바와 같이 이득과 위상 모두 약 1kHz와 100MHz에서 2개의 극(Pole)을 갖지만, 100MHz의 극은 본 연구의 대상 주파수대역에서 크게 벗어나므로 1kHz에 존재하는 극만 고려하여 전달함수를 유도하였다.

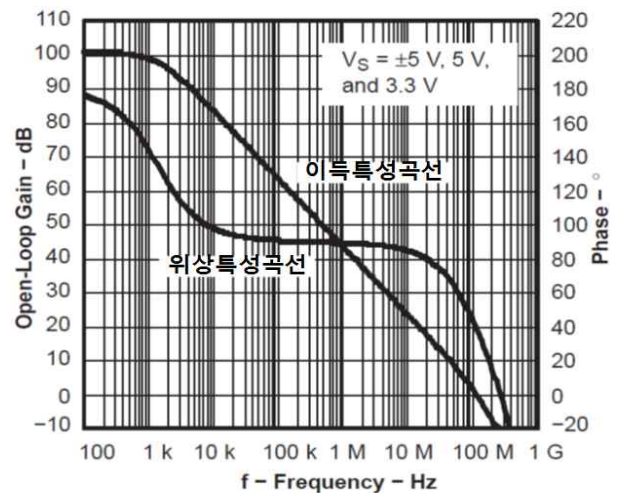


그림 7. SN10503의 이득-주파수, 위상-주파수 특성 그래프

Fig. 7. Gain-Frequency and Phase-Frequency Characteristic Graph of SN10503

그림 7을 토대로 OP-Amp의 Open-loop 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$A(s) = \frac{K}{1 + \frac{S}{A}} = \frac{10^5}{1 + \frac{jw}{2\pi \times 10^3}} \quad (1)$$

K는 DC 이득 값을 나타내며 A는 극이 존재하는 주파수를 나타낸다. f=250kHz로 계산하였다.

식 (1)을 이용하여 피드백계수를 고려한 전달함수는 다음과 같이 얻어진다.

$$H(s) = \frac{A(s)}{1 + F \times A(s)} = \frac{\frac{10^5}{1 + \frac{jw}{2\pi \times 10^3}}}{1 + F \times \frac{10^5}{1 + \frac{jw}{2\pi \times 10^3}}} \quad (2)$$

3.2 설계된 능동 필터의 전달함수 유도

능동 EMI 필터의 잡음감쇄에 대한 이론적 검증을 위해 LISN의 임피던스는 50Ω, Noise Source 임피던스는 0이라 가정하고, 능동제어회로의 전달함수를 유도하였다. 계산과정에서 B급 전력증폭기는 이상적인 증폭기로 가정하였으며, OP-Amp의 입·출력임피던스와 기생성분은 고려하지 않았고, 소수점 넷째자리에서 반올림하여 셋째자리까지 표시하였다.

능동제어회로를 고역통과필터와 대역통과필터, 전대역통과필터, 버퍼, B급 전력증폭기 총 다섯 부분으로 나눈 뒤 (2)식을 이용하여 각각의 전달함수를 유도하면 다음과 같다.

구해진 식 (3)~(7)을 모두 곱하고, 주입 트랜스포머의 권선 비는 1.5로 가정하여 능동제어회로 전체의 전달함수를 구하였다.

$$H_{HPPF}(s) = \frac{R_1(R_2 + R_3)}{SC_1(R_1 + R_2 + R_3) + R_1(R_2 + R_3)} \quad (3)$$

$$= 0.984 \angle 10.237^\circ$$

$$H_{BPF}(s) = \frac{SakC_3R_3R_4}{(akC_2C_3R_3R_4 + C_3R_3R_4)S^2 + (akC_2R_2R_3 + akC_3R_2R_3 + aC_3R_3R_4)S + akR_2 + akR_3} \quad (4)$$

$$= 2.487 \angle 10.237^\circ$$

$$H_{APF}(s) = \frac{(akC_4R_6R_7)s - akR_x}{(C_4R_6R_7)s^2 + (akC_4R_6R_7 + aC_4R_6R_7 - R_x)s + akR_6 - aR_x} \quad (5)$$

$$= 2.289 \angle 160.989^\circ (\because Rx = 2340 \text{ 일 때})$$

$$H_{Buf}(s) = \frac{ak}{ak + a + s} = 1 \angle (-0.143^\circ) \quad (6)$$

$$H_{Amp}(s) = \frac{sL_1}{R_{10} + R_{11} + \frac{1}{SC_5} + \frac{1}{SC_6} + SL_1} = 0.955 \angle 17.7^\circ \quad (7)$$

$$H_{tot}(s) = H_{HPPF}(s) \times H_{BPF}(s) \times H_{APF}(s) \times H_{Buf}(s) \times H_{Amp}(s) \times \frac{N_2}{N_1} = 8.102 \angle 180.13^\circ \quad (8)$$

식 (8)의 전달함수에서 나타내는 바와 같이 필터의 검출신호에 대한 보상신호는 180°에 근접한 역 위상을 가지며 이득 또한 보상신호가 잡음을 감쇄시키는데 적합하도록 증폭된 것을 확인할 수 있다.

4. 실험결과

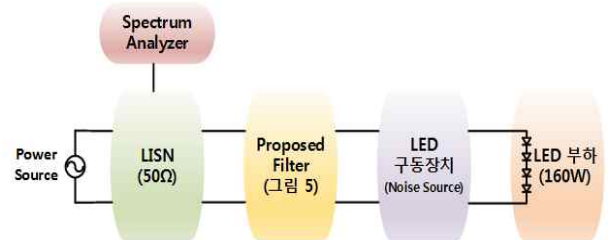


그림 8. 실험장비의 접속 블록도
Fig. 8. Block-Diagram of Experiment Device Connection

그림 8과 같이 실험환경을 구성한 뒤, LISN과 LED 구동장치 사이에 수동필터와 제안된 필터를 삽입하여 잡음감쇄성능을 비교하였다.

그림 9는 수동필터를 삽입하여 측정한 결과이다. 주파수가 증가할수록 임피던스가 증가하는 LC필터 특성에 따라 MHz이상의 고주파 대역에서는 높은 잡음감쇄효과가 나타나지만 250kHz대역의 잡음은 -5dBuV~-10dBuV의 삽입손실을 보이며, 잡음감쇄

효과가 미미하게 나타났다.



그림 9. 수동 EMI 필터의 측정 그래프
Fig. 9. Measurement Graph of Passive EMI Filter

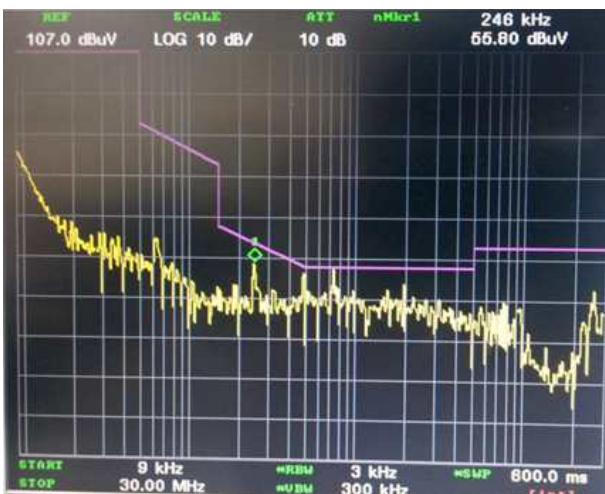


그림 10. 제안된 필터의 측정 그래프
Fig. 10. Measurement Graph of Proposed Filter

그림 10은 제작된 능동 EMI 필터를 LISN과 LED 구동장치 사이에 삽입한 뒤 측정한 결과이다. 필터가 최대 잡음감쇄특성을 나타내도록 설계된 250kHz대역에서 최대 -40dBuV의 삽입손실을 나타내었으며, 전대역에 걸쳐 평균 -20dBuV 정도의 잡음 감쇄효과가 나타나는 것을 확인하였다. 실험결과를 토대로 기존의 수동필터와 제안된 필터의 사양을 비교하면 표 1과 같다.

표 1. 기존 필터와 제안된 필터 비교
Table 1. Compare of Passive Filter And Proposed Filter

	수동필터	제안된 필터
부피	65×32×24mm ₃	73×31×12mm ₃
무게	85g	32g
정격 [V/A]	AC250V/6A	DC50V/3.5A
최대삽입손실 (150kHz~30MHz)	25 dBuV	40 dBuV
평균삽입손실 (150kHz~30MHz)	17 dBuV	20 dBuV

5. 결 론

본 논문에서는 LED 구동장치에서 EMI 잡음제거용으로 주로 사용되던 기존의 EMI 필터에 대한 문제점을 해결하기 위해 수동 EMI 필터와 능동 잡음보상회로를 결합한 능동 EMI 필터를 제안하고 이론적 검증과 실험을 통해 잡음감쇄효과를 확인하였다. 본 논문에서 제안된 능동 잡음보상회로에 작은 크기의 수동 필터를 추가하여 제작한 능동 필터를 LISN과 LED 구동장치 사이에 삽입하였을 때 우수한 EMI 감쇄특성을 나타내는 것을 확인하였다.

실험결과 150kHz~30MHz 대역에 걸쳐서 최고 40dBuV, 평균 20dBuV 감쇄되었다. 또한, 제안된 능동 EMI 필터는 전원선로와 접지사이에 삽입되는 Y-cap을 사용하지 않으므로 기존의 수동 EMI 필터보다 누설전류를 적게 발생시킬 수 있다. 또한 EMI 잡음발생 원인 SMPS의 스위칭주파수를 고려하여 능동 EMI 필터의 보상회로를 설계할 경우 기존에 사용되던 수동 EMI 필터보다 작은 크기, 낮은 정격으로도 효율적인 EMI 잡음감쇄를 나타낼 수 있다.

본 논문은 한국산학연합회의 산학협력력 기술개발 사업 (과제명 : 전자의료기기용 모듈형 Active EMI Filter, 과제번호 : 120121171), 강원대학교 BIT의료융합학 협동과정의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다.

References

- [1] Richard Lee Ozenbaugh, Chul-Su Kim, Byung-Guan Park. "Design and Application of EMI Filter".. Korea Radio Promotion Association. 2008.
- [2] Nam Kim, In-Suck Kim, Jung-Ho Kim, Won-Seo Cho, Yeun-Chun Jung, Gye-Jea Im, Ku-Nyeon Kim. Standardization Research for EMC (Electromagnetic Compatibility). Korea Radio Promotion Association. 2009.
- [3] Jin-Wan Yoo, In-Ung Jeon, Dong-Ho Lee, Dong-Seok Shin, Chong-Yeun Park. Simulation of the Active EMI Filter for a DM Noise from LED Driver . The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Spring Conference 2013. 2013.
- [4] Sun-Bea Bang, Chong-Yeun Park. Development of EMI Filter for Electronic Ballasts for Fluorescent Lamps. Master's Thesis of Kangwon Univ. 2002.
- [5] Yung-Cheol Yang, Ji-Hun Hong, Won-Kyun Han. Active Harmonic Filters and Static Reactive Power Compensation Device. The Korean Institute of Electrical Engineers Fall Conference 2004. 2004. 11.
- [6] Son Yo-Chan, Seung-Ki Sul. A Novel Active Common-mode EMI Filter for Mitigating Conducted EMI. The Korean Institute of Power Electronics Journal. 2002. 7.
- [7] Yo-Chan Son, Seung-Ki Sul. Generalization of Active Filters for EM Reduction and Harmonics Compensation. IEEE TRANSACTIONS ON APPLICATIONS. 2006. VOL. 42.
- [8] Min Zhou, Sicong Lin, Carl Yan, Wei Chen, JianPing Ying. Original CM Noise Suppression in SMPS, Delta Power Electronics Center. 2012.
- [9] SN10503 Datasheet. Texas Instruments. 2009.

◇ 저자소개 ◇



이동호(李同鎬)

1990년 2월 28일생. 대성고등학교 졸업. 강원대학교 전기전자공학부 졸업. 강원대학교 BIT의료융합학 석사과정. 현재 통신 및 신호처리 연구실 소속.
 Tel : (033)250-6292
 Fax : (033)259-5674
 E-Mail : dhl02281@naver.com



최민환(崔民煥)

1974년 5월 21일생. 한국기술교육대학교 전기공학과 졸업. 강원대학교 산업대학원 졸업(석사). 강원대학교 대학원 박사과정 수료. 현재 한국폴리텍대학 춘천캠퍼스 전기과 부교수.
 Tel : (033)260-7687
 Fax : (033)260-7608
 E-Mail : vtwonju@kopo.ac.kr



박종연(朴鍾演)

1951년 2월 23일생. 1973년 고려대 전자공학과 졸업. 1980년 경북대 전자 공학과 졸업(석사). 1984년 경북대 전자 공학과 졸업(박사). 1973~1977년 KIST 연구원. 1977~1984년 울산공대 조교수, 부교수. 1984년~현재 강원대 전기전자 공학과 교수.
 Tel : (033)250-6292
 Fax : (033)259-5764
 E-Mail : cypark@kangwon.ac.kr