

## LED 전광판용 SMPS의 고조파 특성에 관한 연구

(A Study on the Harmonic Characteristics of SMPS Load in LED Display Board)

박준열\* · 고만석 · 장래창 · 최홍규\*\*

(Joon-Yeol Park · Man-Suk Ko · Rae-Chang Jang · Hong-Kyoo Choi)

### Abstract

The prevalence of electronic devices in our modern life is accompanied with the generation of harmonics caused by the nonlinear characteristic load. Especially, the employment of LED have brought the rapid use of SMPS. SMPS is used for supplying the constant DC electric power to the LED display board, but it has a big problem which gives birth of harmonics causing by its high-speed switching. measurement HIOKI 3196 equipment to solve these harmonics were measured.

In this study, we are LED Display Board Load Measuring the impedance response with  $X_L$  changes for removing harmonics in the measured. And we adopted the suitable passive filter by the impedance response characteristic obtained in the  $X_L$  variation experiments. We are trying to deeply the application of passive harmonic filter characteristics that generation in the LED Display Board through EDSA LED simulation.

Key Words : LED Didsplay Board, SMPS, Harmonic, EDSA, THD(Total Harmonic Distortion),  
TDD(Total Demand Distortion), Passive Filter

### 1. 서 론

최근 반도체를 사용한 전기기기의 대량보급과 각종 설비의 자동화에 따라 고조파 발생이 점차 확대되고 있으며 심각한 문제로 떠오르고 있다[1]. 그중에서도 LED(Light Emitting Diode) 산업의 급속한 성장으로 전력변환장치인 SMPS 사용의 급증으로 인해 고조파 발생부하가 증가하고 있고 그에 따른 피해도 점차 늘어나고 있다. SMPS는 Switching Mode Power Supply의 약자로 외부에서 공급되는 교류(AC)를 직류(DC)로 전환 후 각종 전자기기의 조건에 맞는 전압으로 변환시켜 공급하는 장치이지만 전력 송전 시 다

---

\* 주저자 : 홍익대학교 전자전기공학부 교수  
\*\* 교신저자 : 홍익대학교 과학기술대학  
전자·전기공학과 교수  
\* Main author : Professor, Department of Electronic  
and of Electrical Engineering, Hongik  
University  
\*\* Corresponding author : Professor, Department of  
Electronics and Electrical Engineering,  
College of Science and Technology,  
Hongik University  
Tel : 010-4157-3878, Fax : 044-863-7605  
E-mail : raejang4@naver.com  
접수일자 : 2012년 12월 20일  
1차심사 : 2012년 12월 25일, 2차심사 : 2013년 3월 4일  
심사완료 : 2013년 7월 23일

양한 변수로 인해 전압이 수시로 바뀌게 된다. 이에 따라 220V로 공급되는 전기가 그보다 낮거나 높게 공급되기도 한다.

이런 불규칙한 전압이 그대로 공급될 경우 전자기기의 고장 및 성능저하를 가져올 수 있기 때문에 SMPS를 사용하지만 SMPS의 전력 변환 시 고속 스위칭으로 인한 제 3고조파가 발생하는 문제점이 있다. 이러한 제 3고조파는 MCCB, Trip, 케이블, 변압기 소손, 통신선 유도장애 및 전력선 발열이 발생되므로 이를 방지하기 위해 고조파 필터를 설치하여야 한다.

고조파 억제 대책으로는 수동필터 삽입 방식, PWM(Pulse Width Modulation), 클린 웨이브 방식 등이 사용되나 이러한 방식들은 증량과 비용 면에서 많은 단점들을 가지고 있다[2-4].

PWM 방법 중 SHE(Selected Harmonics Elimination) PWM은 1964년 Tum Bull에 의해 제시된 것으로 이는 시스템에 크게 영향을 미치는 특정 저차 고조파를 선정하여 제거하는 방법으로 Patel과 Hoft에 의해 이론적 체계가 성립되었다. 그러나 SHE PWM인버터에서 임의의 고조파를 제거하기 위하여 스위칭각 결정에 있어서 종전에는 대부분 비선형 방식인 Fourier급수를 이용함으로써 초월함수가 포함되어 계산시간이 많이 소요됨은 물론 정확한 해를 구하기가 어렵고 비경제적이며 실시간 시스템구성이 곤란하다[5-8].

따라서 본 연구에서는 가격이 저렴하고, 저 차수 고조파를 제거 하는 데에는 유리한 수동필터를 선정하여 전력 변환장치인 SMPS에서 발생하는 고조파를 국제 기준에 따라 측정하고, 특성을 분석하여 고조파 시뮬레이션을 통해 발생하는 고조파를 수동필터를 적용하여 기준치 이내로 저감시키는 것이 본 연구의 목적이다.

## 2. 본 론

### 2.1 고조파란

고조파는 공급계통의 기본주파수(정현파 : 60Hz)의 정수배 주파수를 가지는 사인과 전압·전류를 말하며,

왜곡된 파형은 기본파와 고조파의 합으로 분리할 수 있다[9].

### 2.2 SMPS 고조파 발생원인

그림 2.1은 SMPS를 이용한 AC-DC전력변환기의 기본 결선도 이다.

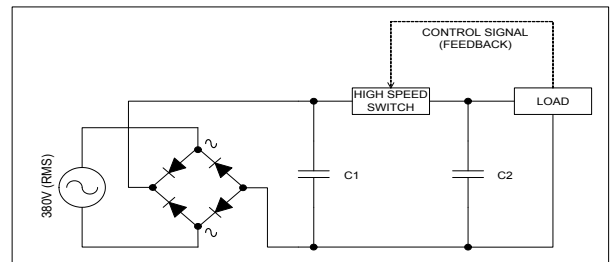


그림 2.1 SMPS의 기본 결선도  
Fig. 2.1 Basic wiring diagram of SMPS

SMPS 전류왜곡을 그림 2.1과 2.2를 기준으로 설명하겠다. 교류전원이 정류기를 통해 정류된 전압은 C1에 충전되며 그 양단 전압  $V_C$ 는 입력전압  $V_P$ 의 최대값에 근접하여 상승하게 된다. 이때  $V_C$ 의 전압이  $V_P$ 보다 낮은  $t_0$ 와  $t_1$ 사이에서는 SMPS로 전류가 투입되지 않으며, 정류된 전압이  $V_C$ 보다 큰  $t_1$ 과  $t_2$ 사이에서는 AC전원은 커패시턴스로 전류를 흘리게 된다. 정류된 전압이  $V_C$ 보다 작게 되는  $t_2$ 와  $t_3$ 사이에서 전류의 흐름이 멈추게 되며 이러한 과정을 반복하게 되면서 고조파전류가 발생한다[10].

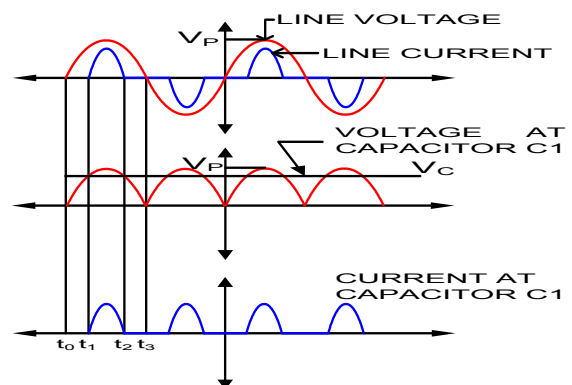


그림 2.2 SMPS의 전류왜곡  
Fig. 2.2 Current distortion of SMPS

2.2.1 고조파 발생 차수

고조파 발생 차수를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$h = np \pm 1$$

h : 고조파 발생 차수, n : 정수 (1, 2, 3, ...)  
p : 정류기 상수

표 2.1 고조파 발생 차수  
Table 2.1 Harmonic generation order

상수	식	발생 차수							
		3	5	7	9	11	13	23	25
단상	2×2±1 : 3, 5	○	○	○	○	○	○	○	○
	3×2±1 : 5, 7								
6상	1×6±1 : 5, 7		○	○					
	2×6±1 : 11, 13					○	○		
12상	1×12±1 : 11, 13						○	○	○
	2×12±1 : 23, 25								○

2.3 고조파 측정

국내 XX박물관내 신설된 LED 전광판 계통에 대하여 고조파 측정 장비 HIOKI 3196로 측정하였다.

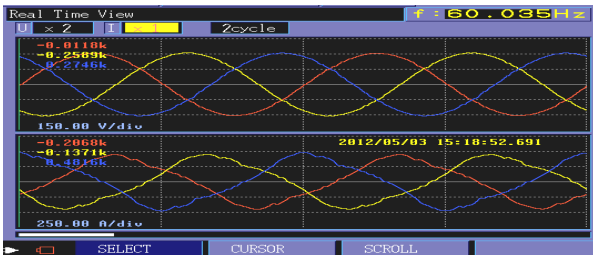


그림 2.3 LED 부하 사용 전 전압, 전류 파형  
Fig. 2.3 Before the LED load used, voltage and current waveforms

그림 2.3은 일반적인 동력, 조명인 선형부하를 사용하고 있으며 LED 부하를 사용하지 않을 때, 그림 2.4는 일반적인 동력, 조명인 선형부하를 사용하고 있으며 LED 부하를 사용하고 있을 때 각 그림의 상단이 전압·하단이 전류파형이다.

그림 2.3과 같이 LED 부하를 사용하지 않을 때에는

전압·전류가 정현파에 가깝다. 그러나 LED 부하를 사용하고 있을 때에는 그림 2.4와 같이 전압은 고조파의 영향에 의해 플랩탑 현상이 나타났으며 전류는 그림 2.2에서 나타내는 전류왜곡이 나타났다.

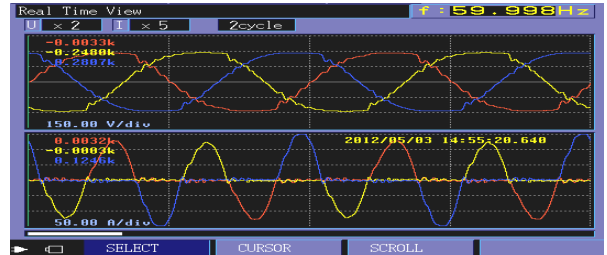


그림 2.4 LED 부하 사용 중 전압, 전류 파형  
Fig. 2.4 Using the LED load, voltage and current waveforms

2.3.1 고조파 전압

다음 표 2.2는 고조파 전압 측정치 이다. 측정결과  $V_{THD}$ 는 IEEE Std. 519 전압 기준인 5% 이내를 만족했다.

표 2.2 고조파 전압 측정치  
Table 2.2 Harmonic voltage measurements

차수	R상		S상		T상	
	V <sub>h</sub> %	V <sub>h</sub> V	V <sub>h</sub> %	V <sub>h</sub> V	V <sub>h</sub> %	V <sub>h</sub> V
1	100	375.8	100	378.2	100	375.2
2	0.05	0.19	0.01	0.04	0.02	0.08
3	3.08	11.57	2.35	8.89	2.36	8.85
4	0.02	0.08	0.02	0.08	0.01	0.04
5	0.22	0.83	0.74	2.80	0.47	1.76
6	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01	0.04
7	1.02	3.83	0.74	2.80	0.66	2.48
8	0.02	0.08	0.01	0.04	0.01	0.04
9	2.20	8.27	2.07	7.83	1.83	6.87
10	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01	0.04
11	0.55	2.07	0.50	1.89	0.86	3.23
12	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01	0.04
13	0.43	1.62	0.24	0.91	0.22	0.83
14	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01	0.04
15	1.43	5.37	1.21	4.58	0.98	3.68
V <sub>THD</sub>	4.24 %		3.56 %		3.37 %	

### 2.3.2 고조파 전류

다음 표 2.3은 고조파 전류 측정치 이다. 측정 결과 3차, 5차, 7차등의 홀수 차수 순으로 고조파전류가 발생함을 알 수 있다.

표 2.3 고조파 전류 측정치  
Table 2.3 Harmonic current measurements

차수	R상		S상		T상	
	I <sub>h</sub> %	I <sub>h</sub> A	I <sub>h</sub> %	I <sub>h</sub> A	I <sub>h</sub> %	I <sub>h</sub> A
1	100	79.03	100	79.03	100	79.03
2	0.14	0.11	0.15	0.12	0.09	0.07
3	74.86	59.16	75.34	59.54	75.73	59.85
4	0.09	0.07	0.10	0.08	0.08	0.06
5	55.96	44.23	55.78	44.08	56.42	44.59
6	0.05	0.04	0.07	0.06	0.05	0.04
7	36.19	28.60	35.99	28.44	35.30	27.90
8	0.03	0.02	0.05	0.04	0.04	0.03
9	21.05	16.64	18.02	14.24	20.56	16.25
10	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.03
11	6.81	5.38	3.66	2.89	10.31	8.15
12	0.04	0.03	0.05	0.04	0.04	0.03
13	6.16	4.87	6.21	4.91	5.20	4.11
14	0.03	0.02	0.04	0.03	0.03	0.02
15	10.34	8.17	8.06	6.37	6.52	5.15
I <sub>THD</sub>	103.34 %		102.59 %		103.74 %	

## 2.4 고조파 시뮬레이션

그림 2.5는 사례연구 계통도 이다. 변전소 공급전압 22.9kV, 단락용량 291MVA, %임피던스 는 100MVA 기준으로 0.18+j34%, 주 변압기의 용량 750kVA, 1차 22.9kV, 2차 380V, 임피던스 Z=5%, X/R=7.11이다.

고조파 시뮬레이션은 EDSA의 Paladin Designbase 4.0 프로그램을 이용하였다. 다음 LED 전광판에서 발생하는 고조파 전류를 발생원으로 넣어 시뮬레이션 한 결과이다.

그림 2.6은 SMPS부하의 고조파 전류 발생 파형이다. 편의상 R상만 나타내었다.

그림 2.7은 SMPS부하의 고조파 전류 함유율이다.

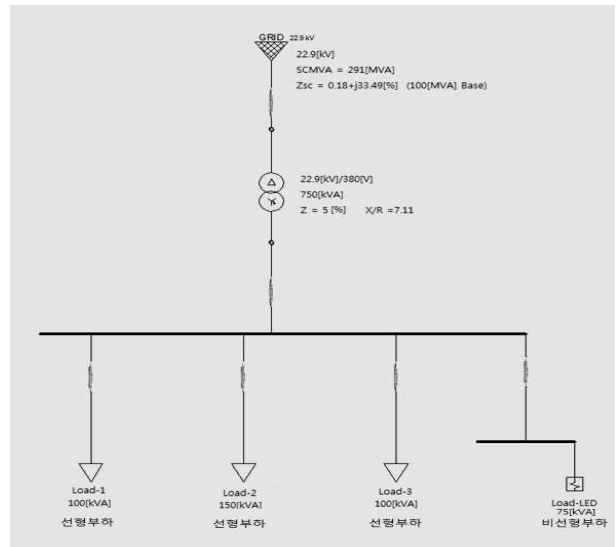


그림 2.5 사례연구 계통도  
Fig. 2.5 Case study diagram

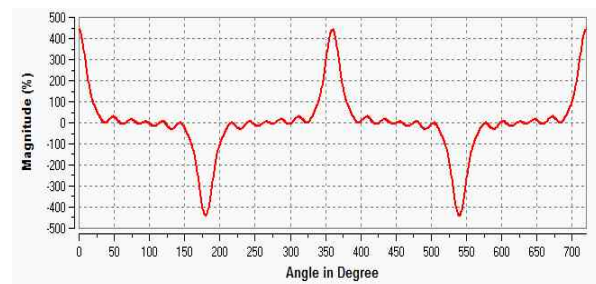


그림 2.6 SMPS 부하의 고조파 전류 발생 파형  
Fig. 2.6 Harmonic current generation waveform of the SMPS load

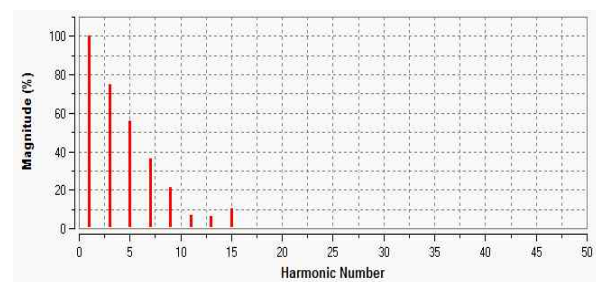


그림 2.7 SMPS 부하의 고조파 전류 함유율  
Fig. 2.7 Harmonic current THD of the SMPS load

그림 2.7을 보면 SMPS에서는 3차, 5차, 7차 등에 해당되는 홀수 차수 고조파 전류가 발생하는 것을 알 수 있다. 그 중에서도 3고조파가 많이 발생했다.

표 2.4 고조파 전압 비교  
Table 2.4 Harmonic voltage comparison

차수	R상		S상		T상	
	M	S	M	S	M	S
1	100	100	100	100	100	100
2	0.05	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
3	3.08	2.82	2.35	2.83	2.47	2.85
4	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
5	0.22	1.95	0.74	1.94	1.69	1.96
6	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
7	1.02	1.58	0.74	1.57	1.33	1.54
8	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
9	2.20	2.29	2.07	1.96	1.91	2.23
10	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
11	0.55	0.50	0.50	0.27	0.63	0.75
12	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
13	0.43	0.48	0.24	0.48	0.34	0.40
14	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
15	1.43	1.79	1.21	1.40	0.96	1.13
V <sub>THD</sub> %	4.24	4.81	3.56	4.51	3.37	4.62

표 2.5 고조파 전류 비교  
Table 2.5 Harmonic current comparison

차수	R상		S상		T상	
	M	S	M	S	M	S
1	100	100	100	100	100	100
2	0.14	0.14	0.15	0.15	0.09	0.09
3	74.86	74.84	75.34	75.32	75.73	75.71
4	0.09	0.09	0.10	0.10	0.08	0.08
5	55.96	55.94	55.78	55.76	56.42	56.40
6	0.05	0.05	0.07	0.07	0.05	0.05
7	36.19	36.18	35.99	35.98	35.30	35.29
8	0.03	0.03	0.05	0.05	0.04	0.04
9	21.05	21.04	18.02	18.01	20.56	20.55
10	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04
11	6.81	6.81	3.66	3.66	10.31	10.31
12	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04
13	6.16	6.16	6.21	6.21	5.20	5.20
14	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03
15	10.34	10.34	8.06	8.06	6.52	6.52
I <sub>THD</sub> %	103.34	103.31	102.59	102.56	103.74	103.71

표 2.4는 순시치 측정(M)에 의한 고조파 전압 함유율 값과 EDSA시뮬레이션(S) 한 고조파 전압 함유율 값이다. 두 측정값이 차이 나는 이유는 고조파 발생원을 전류원으로 하였으며 일반적으로 고조파 발생원은 전류와 전압의 혼합원 이므로 고조파 차수별까지 일치하려면 많은 선행 연구가 필요하다.

다음 표 2.5는 순시치 측정(M)에 의한 고조파 전류 함유율 값과 EDSA 시뮬레이션(S) 고조파 전류 함유율 값을 비교한 것이다. 비교 결과 고조파 전류원을 고조파 발생원으로 사용한 고조파 전류의 함유율은 측정값과 시뮬레이션 값의 오차는 거의 없다.

따라서 IEEE Std. 519 고조파 전류 기준에 부합한지를 확인하기 위해  $I_{TDD}$ 를 구하였다.

22.9kV/380V, 750kVA, Z=5%일 때

$$SCR = \frac{I_{SC}}{I_L} = 20 \text{은}$$

$$I_{SC} = \frac{P \times 100}{\sqrt{3} \times V \times \%Z} \tag{2-1}$$

$$= \frac{750 \times 1000 \times 100}{\sqrt{3} \times 380 \times 5} = 22790.14A$$

$$I_L = \frac{S_n}{\sqrt{3} V_n} = \frac{750000}{\sqrt{3} \times 380} \approx 1,139A \tag{2-2}$$

로 구하며

$$I_{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \times 100 \tag{2-3}$$

으로 구한다.

각 상의  $I_{TDD}$ 는 R상 7.17%, S상 7.12%, T상 7.2%이다.

$I_{TDD}$ 는 표 2.6 IEEE Std. 519 고조파 전류 기준을 이용하여 판단한다[11].

시뮬레이션 분석결과 값은 각 상의 합을 평균으로 나는 값이다.  $V_{THD}=4.65\%$  로 IEEE Std. 519 기준치인 5%이내로 적합하지만  $I_{TDD}=7.16\%$ 로 고조파 전류 관

리 기준치 7%를 초과하였으므로 고조파 필터를 설치해야 한다.

표 2.6 IEEE Std. 519 고조파 전류 기준  
Table 2.6 IEEE Std. 519 harmonic current standards

$V_n = 120V \sim 69kV$						
$SCR = \frac{I_{sc}}{I_L}$	Individual Harmonic Order(Odd Harmonics)					TDD
	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 < h	
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 ~ 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 ~ 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 ~ 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

주 (1) 짝수 고조파의 관리기준은 상기 홀수 고조파의 25% 이내  
(2)  $I_{sc}$  : 단락전류  $h$  : 고조파 차수  
TDD : Total demand distortion SCR : 단락비

### 2.5 고조파 필터 설계

수동필터는 크게 저차 고조파를 제거하는 동조필터와 높은 차수의 고조파(17차 이상)를 제거하는 하이패스(High pass) 필터로 구분할 수 있으며 그중 동조필터를 선정하였다. 그 이유는 능동필터에 비해 수동필터가 가격이 저렴하고 SMPS는 제 3차 고조파가 많이 발생 하며 저 차수 고조파를 제거하는 데에는 동조필터가 유리기 때문이다. 그림 2.8은 동조필터의 구성을 보여주고 있다.

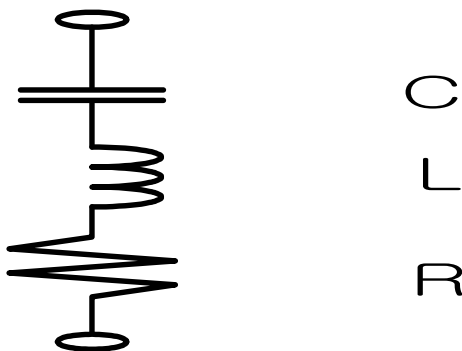


그림 2.8 동조필터  
Fig. 2.8 A Single-tuned filter

$n$ 차 고조파필터의 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_n = R_n + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C_n}\right) \quad (2-4)$$

공진주파수에서  $\omega L = \frac{1}{\omega C_n}$  이므로  $Z_n = R_n$  이 된다.

즉, 제거하고자 하는 고조파 차수(h)에서 동조가 일어나도록 하면 된다.

$$h = \frac{1}{\omega_0 \sqrt{L_r C_r}} \quad (2-5)$$

여기서  $\omega_0$ 는 시스템 각 주파수로 377[rad/s]이다. 부하의 주파수가 동조주파수와 일치하면 동조필터의 임피던스는 저항이 작을 경우 거의 영이 된다. 따라서 동조 주파수의 전류는 동조필터로 유입(Sink)되는 원리이다[12-13].

$X_L = 5 \Omega$ 일 때 고조파 전압 · 전류를 비교하기 위해 설계하였다.

제 3차 고조파 필터의 제원은  
 $R = 0.001 \Omega$ 일 때

$$X_C = h^2 \cdot X_L \Omega \quad (2-6)$$

표 2.7  $X_L = 5 \Omega$ 에 따른 L, C 값  
Table 2.7 L,C value according to  $X_L = 5 \Omega$

$X_L \Omega$	$X_C \Omega$	L mH	C mF
5	45	13.26291	0.0589462

#### 2.5.1 필터 적용 시 고조파 분석

측정 분석결과 값은 각 상의 합을 평균으로 나눈 값이다.

다음 표 2.8은  $X_L = 5 \Omega$ 일 때 필터 설치 후  $V_{THD,전} = 4.65\%$ 에서  $V_{THD,후} = 3.66\%$ 로 21.23% 감소하였고  $I_{THD,전} = 103.19\%$ 에서  $I_{THD,후} = 73.68\%$ 로 28.60% 감소하였다.

표 2.8  $X_L = 5\Omega$ 일 때 고조파전압, 전류 및 왜형률  
Table 2.8 Harmonic voltage, current and THD  
when  $X_L = 5\Omega$

		설치전	설치후
R상	$V_R$ V	372.62	372.62
	$V_{THD,R}$ %	4.81	3.876
S상	$V_S$ V	372.56	372.57
	$V_{THD,S}$ %	4.51	3.490
T상	$V_T$ V	372.58	372.59
	$V_{THD,T}$ %	4.62	3.615
		설치전	설치후
R상	$I_R$ A	113.63	93.82
	$I_{THD,R}$ %	103.31	74.355
S상	$I_S$ A	113.2	93.07
	$I_{THD,S}$ %	102.56	72.675
T상	$I_T$ A	113.86	93.67
	$I_{THD,T}$ %	103.71	74.001

### 2.6 고조파 평가

필터 설치 전  $V_{THD}$  값은 기준치 이내였기 때문에 EDSA 프로그램을 사용하여 구한 홀수 차수 고조파 전류 값을 가지고  $I_{TDD}$  값으로 환산하였다.

표 2.9  $X_L = 5\Omega$ 일 때 고조파 전류 평가  
Table 2.9 Harmonic current evaluation when  
 $X_L = 5\Omega$

차수	IEEE Std.519 Harmonic limits %	R상	S상	T상
		$I_{TDD,R}$ %	$I_{TDD,S}$ %	$I_{TDD,T}$ %
5	7	3.86	3.85	3.89
7	7	2.50	2.49	2.44
9	7	1.45	1.24	1.42
11	3.5	0.47	0.25	0.71
13	3.5	0.43	0.43	0.36
15	3.5	0.71	0.56	0.45

표 2.10 고조파 전류 평가  
Table 2.10 Harmonic current evaluation

	R상	S상	T상
	$I_{TDD,R}$ %	$I_{TDD,S}$ %	$I_{TDD,T}$ %
$X_L = 5\Omega$	4.915	4.804	4.892

$X_L = 5\Omega$ 일 때  $I_{TDD}$  값은 IEEE Std. 519 기준인 7% 이하로 모두 만족 하였고 개별 차수 또한 모두 기준치를 초과하지 않았다.

### 3. 결 론

LED 전광판 등에 사용되는 전력변환장치인 SMPS는 전력 변환 시 고속 스위칭으로 인해 고조파가 발생한다. 그러나 변압기 용량 750kVA에 비해 LED전광판 부하는 약 75kVA으로 상대적으로 작지만 LED산업의 발달로 부하용량이 증가하면 홀수 차 고조파 문제가 발생할 것으로 사료되었다.

따라서 EDSA 시뮬레이션을 사용하여 LED전광판 부하를 측정 한 고조파 전류를 시뮬레이션에서 고조파 전류원으로 하여 사례 연구 계통도를 구성하였다.

시뮬레이션 결과, 필터 설치 후 동조필터의  $X_L = 5\Omega$ 일 때  $I_{TDD}$  값은 표 2.10과 같으며 IEEE Std. 519 기준인 7%이하로 모두 만족하였으며  $X_L = 5\Omega$ 일 때  $V_{THD} = 3.66\%$ 로 설치 전보다 21.23% 감소하였고,  $I_{TDD} = 4.87\%$ 로 설치 전보다 31.98% 감소하여 고조파 함유 가장 낮았다. 동조필터설계 시  $X_L$ 이 낮을수록  $I_{TDD}$  값이 낮아짐을 알 수 있다.

전력변화 장치인 SMPS는  $V_{THD}$ (고조파 전압 총합 왜형률) 값은 적지만  $I_{THD}$ (고조파 전류 총합 왜형률) 값이 높은 특성이 나타났으며, 그 중 제 3고조파가 높아 이를 저감 시키기 위해 동조 필터 선정하여 필터설계 후 EDSA시뮬레이션을 통해 고조파 저감을 검증하였다. LED산업의 발달로 SMPS 부하가 증가하면 홀수 차 고조파에 대한 대책이 요구될 것으로 판단된다.

본 연구는 2013학년도 홍익대학교 교내 연구비로 수행되었음.

## References

- [1] Hong-Kyoo Choi et al, "The latest power facilities using equipment design" Sungandang.
- [2] B.K Bosc, H.A sutherland, "A high performance Pulse Width Modulator for an inverter fed drive system using a micro processor" IEEE IAS Annual meeting conference record, pp. 847~853.
- [3] KATAOKA, T. MIZUMACHI and MIYARI "A pulse width controlled AC to DC converter to improve power factro and waveform of AC line current" IEEE Trans, Vol. IA-15, pp. 670~675.
- [4] K.S Rajashekark and J. Vithavathil, "Microprocessor based sinusoidal PWM inverter by DMA transfer", IEEE Trans, Ind. Electron, Vol. IE-29, pp. 46~51.
- [5] J.A Houldsworth and D.A Grant, "The use of harmonic distortion to increase the output of a three-phase PWM inverter", IEEE Trans, Ind. Appl. Soc., Vol. IA-20, pp. 1224~1228.
- [6] J.M. D. Murphy, L.S. Howard, and R.G. Hoft, "Microprocessor contro of a PWM inverte induction moter drive", Conf. Rec. IEEE/PESC. pp. 344~348.
- [7] G.B. Klinman and A.B. Plunkett, "Development of a modulation strategy for a PWM inverter drive", IEEE Trans, Ind. Appl., Vol. IA-15, pp. 72~79.
- [8] S.R Bowes, "Harmonic minimization in microprocessor controlled current fed PWM inverter drives", IEE. Proc, Vol. 134, pp. 25~40.
- [9] R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, and H.W. Beaty, "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill, 1996.
- [10] EDSA User's Guide, "Electrical Power System Harmonic Analysis Program", EDSA Micro co., 2009.
- [11] IEEE Industry Applications Society & Power Engineering Society, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Hammonic Control in Electrical Power Systems" IEEE Std 519\_1992.
- [12] H. L. Willis, "Power System Capacitors", Taylor & Francis, 2005.
- [13] R. C. Dugan, "Electrical Power Systems Quality", Second Edition, McGraw-Hill, 2002.

## ◇ 저자소개 ◇



**박준열**(朴俊烈)

1950년 3월 20일생. 1974년 서울대학교 졸업. 1977년 서울대학교 졸업(석사). 1987년 서울대학교 졸업(박사). 1988~1989년 City University(London) 객원 교수. 1980년~현재 홍익대학교 전자전기 공학부 교수.



**고만석**(高萬錫)

1971년 1월 18일생. 2000년 홍익대학교 졸업. 2002년 홍익대학교 졸업(석사). 2012년 홍익대학교 박사수료.



**장래창**(張來彰)

1987년 1월 5일생. 2011년 홍익대학교 졸업. 2013년 홍익대학교 졸업(석사).



**최홍규**(崔洪圭)

1950년 1월 7일생. 현재 홍익대학교 과학 기술대학 전자·전기공학과 교수.