

전자식 안정기의 고조파 저감 대책

(A Study on the Harmonic Analysis of an Electronic Ballast)

최홍규 · 홍순석 · 오정석 · 유태군*

(Hong-Kyu Choi · Sun-Suk Hong · Jung-Suk Oh · Tae-Kun Yoo)

Abstract

Electric ballast is widely used to turn on the fluorescent. Electric ballast measure occurrence of harmonic through the actual measurement and it is simulated by modeling equivalent circuit for harmonic analysis. The purpose of this paper is to give an equivalent circuit modeling methodology for the harmonic currents generated by single-phase personal computer loads to evaluate a commercially available series resonant filter for the harmonic currents compensation based on the IEC std 61000-3-2 and IEEE 519 standards for limiting harmonic distortion.

1. 서론

전자식 안정기는 에너지절약 효과뿐만 아니라 고주파 점등(1초에 5~10만번 깜박임)은 눈으로 감지할 수 없는 양질의 빛을 공급하여 시력을 보호한다. 또한, 자기식 안정기의 Choke Coil과 철심 Core에 의해 생기는 전자력의 진동에 의한 소음(Ballast Hum)을 제거할 수 있다. 전자식 안정기서 사용되는 소자들에 의해서 고조파가 발생 하고 있어 고조파 발생량을 측정하고, 그것을 근거로 모델링 및 시뮬레이션을 하였으며, 직렬·병렬 필터를 구성하여 고조파 저감 효과를 알아보았다.[1-3]

2. 본론

2.1. 직렬 및 병렬 동조 필터

고조파 전류를 저감시키는 수단으로 동조필터가 널리 쓰이고 있다. 동조 필터는 가격이 저렴하고, 설치의 용이성, 견고성, 효율성의 장점들이 있어 현장에서 주로 적용되고 있다.

그림 1는 전자식 안정기에 적용한 직렬 동조필터(SCRFF:Series Connected Resonant Filter)의 회로도이다.

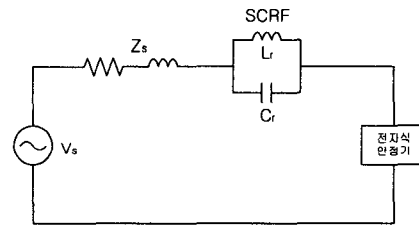


그림 1. 직렬 동조필터 적용 회로도
fig. 1. Circuit Diagram of a SCRFF Application

그림 1에서 V_s 는 공급전압[V], Z_s 는 전원측 임피던스 [Ω]이다. 직렬 동조필터는 리액터(L_r)와 콘덴서(C_r)가 병렬로 연결되어 있고, 직렬 동조필터는 전자식 안정기와 직렬로 연결되어 있다.

동조필터의 설계값은 부하에 따라 정해진다. 제거하고자 하는 고조파 차수(h)에서 동조가 일어나도록 하면 된다.

$$h = \frac{1}{\omega_0 \sqrt{L_r C_r}} \tag{1}$$

여기서 ω_0 는 시스템의 각 주파수는 377[rad/s]이다.

부하의 주파수가 동조 주파수와 일치하면 동조필터의 임피던스는 무한대가 된다. 따라서 주파수의 전류는 동조필터에서 차단(block)되는 원리이다.

병렬 동조필터(PCRF: Parallel Connected Resonant Filter)는 그림 2에서 보여주고 있다.

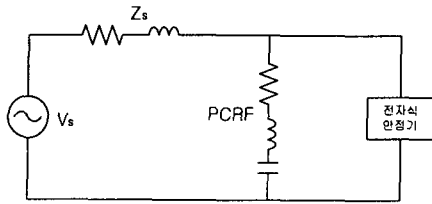


그림 2. 병렬 동조필터 적용 회로도
fig. 2. Circuit Diagram of a PCRF Application

병렬 동조필터는 리액터(L_r), 와 콘덴서(C_r)가 직렬로 연결되어 있다. 동조 필터의 설계 값은 직렬 동조필터와 같은 원리이다. 부하의 주파수가 동조 주파수와 일치하면 동조 필터의 임피던스는 영이 된다. 동조 주파수의 전류는 동조 필터로 유입(sink)되는 원리이다.

표 1. 전압 및 전류의 고조파 함유률
Table 1. Harmonic Spectrum of Voltage and Current

고조파 차수(h)	전압		전류	
	크기[%]	위상[°]	크기[%]	위상[°]
1	100	0	100	17.86
3	0.14	129.66	15.44	-174.85
5	0.58	-188.88	0.91	-100.04
7	0.58	52.84	2.3	86.11
9	0.12	-169.39	0.83	-101.15
11	0.32	39.57	0.66	145.09
13	0.46	154.55	1.37	-176.95
15	0.02	-112.08	0.17	-61.47
17	0.09	77.7	0.14	40.19
19	0.16	-164.24	0.65	-128.56
21	0.01	-29.97	0.27	34.18
23	0.14	150.27	0.45	-122.99
25	0.04	-82.69	0.17	-0.2
27	0.07	103.37	0.24	161.05
29	0.13	176.5	0.3	-136.5
31	0.11	-82.53	0.6	-36.88
33	0.06	112.54	0.35	179.11
35	0.11	161.67	0.43	-99.93
37	0.03	-31.9	0.29	25.59
39	0.06	149.53	0.25	-157.48

표 1은 전자식 안정기에서 발생하는 고조파를 실측 값이다. 표 1에서 나타난 것과 같이 제3고조파 발생량이 많음을 알 수 있었다.

직렬·병렬 동조 필터 설계 값은 14[%]리액터를 택하였고, 전압 220[V], 주파수 60[Hz], 정격 전류 1[A]에서 구하면 된다.

$$V_L = 0.14 \times 220 = 30.8 [V]$$

$$X_L = \omega L = \frac{30.8 V}{1 A} = 30.8 [\Omega]$$

$$\therefore L_r = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{30.8}{2 \times 3.14 \times 60} \times 10^3 \approx 81.748 [mH]$$

전자식 안정기 부하의 고조파 성분을 분석하면 주로 제3, 5고조파가 많이 포함되어 있으므로 동조 주파수 4 고조파를 선택하여 콘덴서 값을 구한다.[4-7]

$$X_C = h^2 X_L = 4^2 \times 30.8 = 492.8 [\Omega]$$

$$\therefore C_r = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 60 \times 492.8} \times 10^6 \approx 5.38 [\mu F]$$

3. 사례 연구

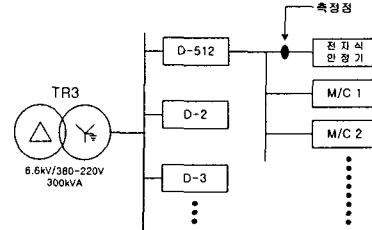


그림 3. 사례연구 시스템의 단선도
fig. 3. Single-Line Diagram of The Electrical Distribution System Under Study

전자식 안정기는 KS C 8100의 저고조파 함유형 (20[%] 이하)으로 정격 입력 전압 220[V], 주파수60[Hz], 입력 전류 0.35[A], 역율 98[%]의 FL 32×2등용 전자식 안정기이다. 고조파 측정 장비는 CA8332 모델은 노트북과 연결시켜 50차 고조파까지의 전류(3000A), 전압 (120-240[V] PT 사용) 및 전력을 측정하여 모니터에서 확인하고 컴퓨터에 데이터를 저장할 수 있다.

고조파 평가 기준은 종합 고조파 왜형률(THD: Total Harmonic Distortion)로 나타낼 수 있다.

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100 [\%] \quad (2)$$

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100 [\%] \quad (3)$$

여기서, V_1 , I_1 은 기본파 (60Hz)의 전압과 전류이고 V_n , I_n 은 n차 고조파 전압과 전류를 나타낸다. 전자식 안정기는 점등 상태에 따라 변하므로 어느 한 순간의 전압, 전류 및 전력의 파형을 분석하여야 한다. 그림 4(a)는 필터 설치전의 전류 및 전압의 파형으로 2cycle(33msec)동안 측정된 값이고, 그림 4(b)는 전류 스펙트럼이다.

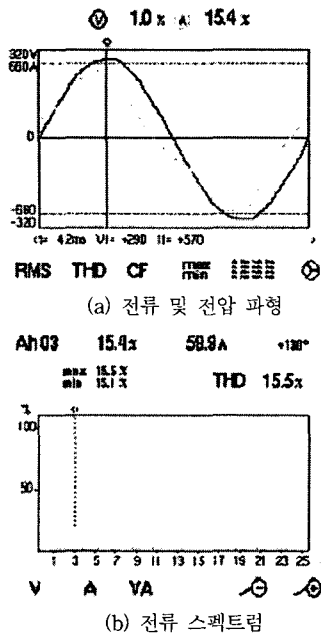


그림 4. 필터 설치전 전류 및 전압 파형
fig. 4. Current and Voltage Waveforms

4. 부하 모델링

고조파 해석용 등가회로를 구성하려면, 비선형 부하의 고조파 전압과 전류 측정이 우선되어야 한다.

측정점에서 본 전압입(V_h)은 기본파 전압(V_1)과 고조파 전압(V_h)의 합으로 나타낼 수 있다.

여기서 V_h 의 h는 2,3,4...이다.

IEEE Std. 519-1992에 따르면 비선형 부하전류(I_L)는 기본파 전류(I_1)에 의한 임피던스 부하(Z_L)와 고조파 전류(I_h)의 합으로 나타낼 수 있다.

$$I_L = I_1 + I_h \quad (4)$$

$$Z_L = R_L + jX_L = \frac{|V_h|^2 (P_L + jQ_L)}{P_L^2 + Q_L^2} [\Omega] \quad (5)$$

여기서, P_L 은 부하의 유효전력[W], Q_L 은 부하의 무효전력[Var], V_h 은 부하의 정격전압[V]이다.

따라서 측정점에서 본 컴퓨터 부하의 단상 등가회로는 그림 5와 같다.

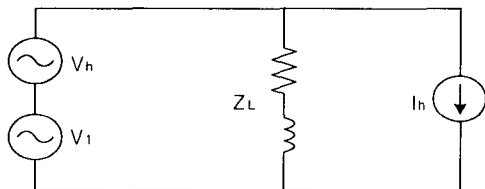


그림 5. 전자식 안정기 부하의 단상 부하의 등가회로
fig. 5. Single-phase Equivalent Circuit of electrical ballast

공급 전압은 전압 왜형율이 1.0[%] 이내로 거의 정현파이다. 앞에서 구한 C_r , L_r 를 직렬 및 동조 필터를 구성하였다.

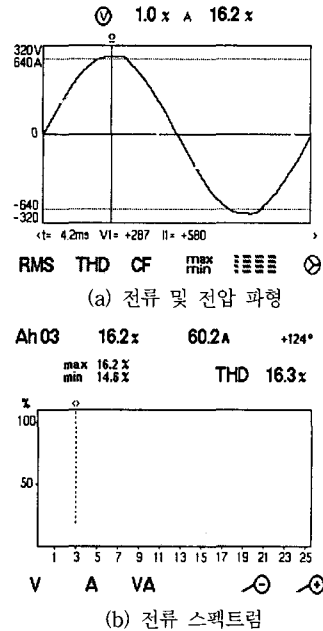


그림 6. 직렬 동조 필터 설치후 전류 및 전압 파형
fig. 6. Current and Voltage Waveforms With SCRf

병렬 동조 필터를 구성 했을때의 그래프이다.

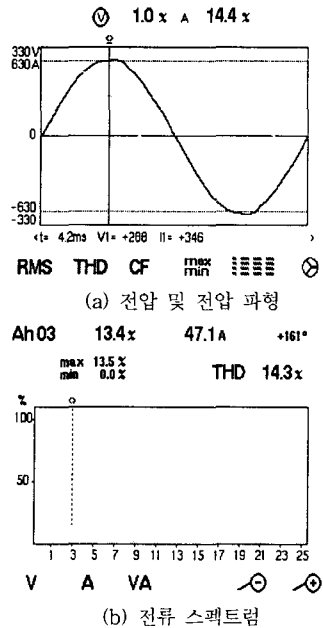


그림 7. 병렬 동조 필터 설치후 전류 및 전압 파형
fig. 7. Current and Voltage Waveforms With PCRf

그림 6, 7에서와 같이 $C_r=10[\mu\text{f}]$, $L_r=60[\text{mH}]$ 에서는

직렬 및 병렬 동조 필터에서 제3고조파를 저감 시키지는 못했다. 그래서 최적의 필터 효과를 낼수 있는 C_r , L_r 를 산정하기 위해서 C_r 값을 ($C_r=5, 10, 20, 30$)으로 고정을 하고, L_r 값을 5, 10, 20, 40, 50, 60, 80, 160, 300으로 변화를 주면서 제3고조파의 저감효과와 THD의 크기를 비교 할 수 있었다. 다음 표들은 C_r 고정, L_r 를 변화를 주면서 직렬 동조 필터의 실험 데이터 값들이다.

표 2. 직렬 병렬 동조 필터 비교표($C_r=5$ 로 고정)

Table 2. Series and Parallel Resonant filter($C_r=5$)

(단위: $C_r=\mu F$, $L_r=mH$)

	$C=5$ $L=5$	$C=5$ $L=10$	$C=5$ $L=20$	$C=5$ $L=40$	$C=5$ $L=50$	$C=5$ $L=60$	$C=5$ $L=80$	$C=5$ $L=160$	$C=5$ $L=300$
직렬 동조 필터	16.60	16.10	15.02	14.61	15.87	15.35	5.21	8.44	23.23
병렬 동조 필터	17.54	18.27	17.94	17.25	16.99	17.34	18.36	17.72	12.72
직렬 THD	17.15	16.34	15.38	14.83	16.19	15.67	6.98	9.59	24.21
병렬 THD	18.96	19.64	19.5	18.68	18.64	18.97	18.8	18.02	13.58

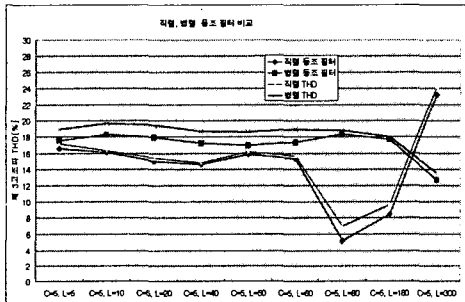


그림 8. 직렬 병렬 동조 비교 그래프

fig. 8. Comparison Between Series and Parallel Resonant Filter

직렬, 병렬 동조 필터의 측정값은 제3고조파 값을 나타낸 것이며 직렬·병렬 THD를 비교하였다. 직렬 동조 필터로 구성하였을 때, $C_r=5[\mu F]$, $L_r=80[mH]$ 일 때 제3고조파는 5.21[%]이고, THD는 6.98[%]이다. L_r 를 160, 300[mH]로 변화를 하였으나, 표 2에서 나타난 것과 같이 제3고조파는 8.44, 23.23[%]로 증가를 했다. $L_r=300[mH]$ 인 경우에는 제3고조파를 상쇄시킬 목적으로 공진주파수를 만들었으나, 기존의 제3고조파와 합쳐져 제3고조파를 더 발생시키는 것을 확인 할 수 있었다. 병렬 동조 필터로 구성을 하였을 때는 $L_r=5\sim 160[mH]$ 까지는 필터 설치전의 전류 THD보다 오히려 커지다가, $L_r=300[mH]$ 일 때 약간 잠잠 되는 효과를 볼 수 있었다.

표 3. 직렬, 병렬 동조 필터($C_r=10$ 로 고정)

Table 3. Series and Parallel Resonant filter($C_r=10$)

	$C=10$ $L=5$	$C=10$ $L=10$	$C=10$ $L=20$	$C=10$ $L=40$	$C=10$ $L=50$	$C=10$ $L=60$	$C=10$ $L=80$	$C=10$ $L=160$	$C=10$ $L=300$
직렬 동조 필터	16.21	15.24	15.18	13.83	15.23	16.20	14.21	18.02	32.47
병렬 동조 필터	13.33	13.25	13.85	13.71	13.30	13.38	13.31	12.04	9.46
직렬 THD	16.49	15.53	15.45	14.33	15.52	16.46	14.54	18.36	38.73
병렬 THD	14.83	14.84	14.99	14.98	14.63	14.59	14.02	12.97	10.67

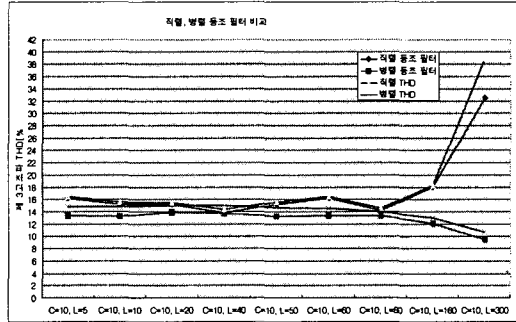


그림 9. 직렬 병렬 동조 비교 그래프

fig. 9. Comparison Between Series and Parallel Resonant Filter

표 3과 그림 9에서는 직렬 동조 필터 보다 병렬 동조 필터에서 저감 효과를 볼 수가 있었다.

표 4. 직렬, 병렬 동조 필터($C_r=20$ 로 고정)

Table 4. Series and Parallel Resonant filter($C_r=20$)

	$C=20$ $L=5$	$C=20$ $L=10$	$C=20$ $L=20$	$C=20$ $L=40$	$C=20$ $L=50$	$C=20$ $L=60$	$C=20$ $L=80$	$C=20$ $L=160$	$C=20$ $L=300$
직렬 동조 필터	14.24	15.45	15.17	11.19	15.68	16.47	16.85	19.72	22.32
병렬 동조 필터	13.92	13.84	13.86	13.83	13.81	13.8	13.09	11.51	9.02
직렬 THD	14.77	15.70	15.65	11.94	15.91	16.81	17.16	20.57	32.02
병렬 THD	14.68	14.47	14.46	14.66	14.55	14.5	13.3	11.83	9.5

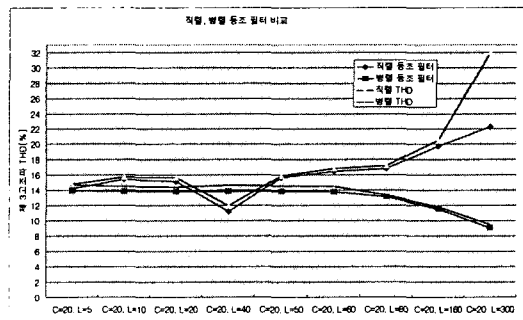


그림 10. 직렬, 병렬 동조 비교 그래프

fig. 10. Comparison Between Series and Parallel Resonant Filter

표 4, 그림 10에서는 병렬 동조 필터 구성을 했을 때 저감 효과를 볼 수 있었다.

표 5. 직렬 동조 필터($C_f=30$ 로 고정)

Table 5. Series and Parallel Resonant filter($C_f=30$)

	C=30 L=5	C=30 L=10	C=30 L=20	C=30 L=40	C=30 L=50	C=30 L=60	C=30 L=80	C=30 L=160	C=30 L=300
직렬 동조 필터	16.15	15.17	7.74	16.27	15.46	16.10	16.66	17.50	1.81
병렬 동조 필터	14.47	14.31	14.29	14.28	14.33	14.3	13.27	11.71	8.73
직렬 THD	16.44	15.63	8.83	16.51	15.87	16.57	16.97	19.48	14.86
병렬 THD	14.91	14.73	14.71	14.6	14.81	14.69	13.45	11.9	8.9

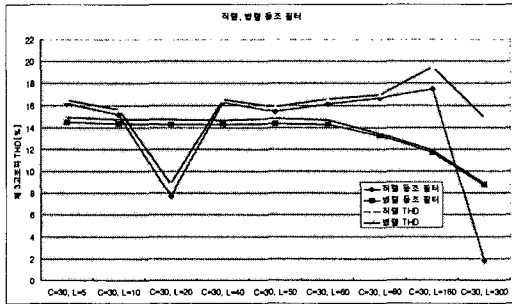


그림 11. 직렬 병렬 동조 비교 그래프
fig. 11. Comparison Between Series and Parallel Resonant Filter

표 5, 그림 11에서 보는 것과 같이 병렬 동조 필터 구성을 했을 때 저감 효과를 볼 수 있었으나, $C_f=30[\mu F]$, $L_f=20[mH]$ 일 때와 $L_f=300[mH]$ 일 때의 제3고조파를 저감하는 효과를 볼 수는 없었다. $C_f=30[\mu F]$, $L_f=20[mH]$ 를 보면 제3고조파 7.74[%], THD 8.83[%]으로 줄어들었고, $L_f=300[mH]$ 일 때 직렬 동조 필터 구성을 했을 때 제3고조파는 1.81[%]로 실측 데이터 중에 가장 많은 저감 효과를 볼 수 있었지만, THD는 14.86[%]이다. 이것은 제3고조파가 줄어드는 대신에 제5고조파 12.72[%], 제7고조파 2.71[%], 제9고조파 3.89[%], 제11고조파 3.99[%] 등 제 3고조파 이외의 고조파가 증가를 해서 THD는 필터 설치전과 큰차이는 없다. 병렬 동조 필터 구성을 했을 때 제3고조파 8.73[%], THD는 8.9[%]이다. 병렬 동조 필터 구성을 했을 때의 저감 효과가 크다.

다음 그림 12는 $C_f=5[\mu F]$, $L_f=80[mH]$ 로 직렬 동조 필터를 구성을 했을 때 실측 결과이다.

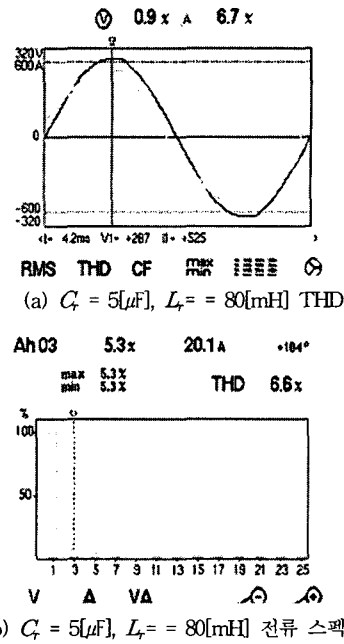


그림 12. $C_f = 5[\mu F]$, $L_f = 80[mH]$ 전압, 전류 파형
fig. 12. $C_f = 5[\mu F]$, $L_f = 80[mH]$ is Voltage and Current Waveforms

고조파 해석용 단상 등가회로(그림 5)에 실측한 데이터를 적용하여 MATLAB을 사용한 시뮬레이션 결과를 요약한다.

그림 13(a)는 필터 설치후의 전압 파형이고, 그림 13(b)는 필터 설치후의 전류 파형이다.

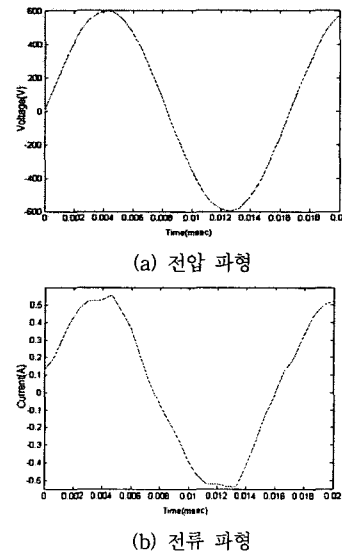


그림 13 전압, 전류 파형
fig. 13. Simulated Voltage and Current Waveforms

표 6. 측정값과 MATLAB Simulation 비교
Table 6. Comparisons between measurement and MATLAB Simulation

	측정	MATLAB Simulation
전류[A]	0.385	0.3863
THD[%]	6.7	6.828

$C_f=5[\mu F]$, $L_r=80[mH]$ 일때 최적의 제3고조파와 THD 저감 효과를 볼 수 있었다. 전자식 안정기는 고조파 전압 발생원인 것을 실험으로 확인 할 수 있다.

5. 국제 고조파 관리 기준

비선형 부하는 많은 고조파 전류를 발생시켜, 다른 부하뿐만 아니라 전력 공급자 측에도 고조파 장애를 일으킨다. 외국의 많은 국가들이 고조파 관리 기준을 마련하여 고조파를 관리하고 있다. 가장 널리 사용되고 있는 국제 고조파 관리 기준은 IEC 61000과 IEEE 519이다.

5.1 IEC 1000-3-2

보다 더 구체적인 저감 효과를 알아보기 위해 전자식 안정기 부하의 직렬 및 병렬 동조 필터를 사용한 고조파 저감효과를 IEC Std 61000-3-2의 Class C로 평가를 하였다.[8]

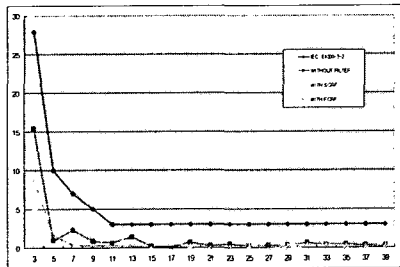


그림 13. 직렬, 병렬 동조필터 설치 전후와 IEC Std61000-3-2 Class 기준과의 비교 그래프
fig 13. Comparison between series-parallel resonant filters results and IEC Std 61000-3-2

표 7. 직렬, 병렬 동조필터 설치 전후와 IEC Std 61000-3-2 Class 기준과의 비교 그래프
Table 7. Comparison between series-parallel resonant filters results and IEC Std 61000-3-2

고조파 차수	IEC 61000-3-2	WITHOUT FILTER	WITH SCRF	WITH PCRF
3	27.9	15.44	5.21	8.73
5	10	0.91	3.81	1.56
7	7	2.3	1.74	0.34
9	5	0.83	0.4	0.31
11	3	0.66	1.19	0.33
13	3	1.37	0.91	0.21
15	3	0.17	0.11	0.14
17	3	0.14	0.59	0.06
19	3	0.65	0.27	0.11
21	3	0.27	0.09	0.08
23	3	0.45	0.14	0.09
25	3	0.17	0.27	0.06
27	3	0.24	0.14	0.06
29	3	0.3	0.35	0.03
31	3	0.6	0.45	0.08
33	3	0.35	0.35	0.06
35	3	0.43	0.33	0.07
37	3	0.29	0.16	0.1
39	3	0.25	0.28	0.15

표 7에 나타난거와 같이 전자식 안정기는 IEC Std 61000-3-2 Class C 규정을 만족한다. 그러나 직렬, 병렬 동조 필터를 구성 했을 때 저감 효과를 볼 수가 있었다.

5.2 IEEE 519-1992

IEEE 519는 수용가 인입구(PCC, The Point Common Coupling)에서 고조파 기준을 제한하고 있다. 고조파 측정점(전자식 안정기의 전력 공급점)을 기점으로 IEEE 519를 적용하기로 한다. 전자식 안정기 부하는 단상 변압기로부터 전력을 공급 받는다고 가정한다.[9]

변압기 제원은 300[kVA], 380/220[V], 임피던스 5[%] 이고, 평균부하 전류(I_L)는 0.5[A]이다. 단락 전류(I_{sc})와 단락용량(SCR, Short Circuit Ratio)을 계산한다.

$$I_{sc} = \frac{300,000}{\sqrt{3} \times 380 \times 0.05} \approx 9100 [A]$$

$$SCR = \frac{I_{sc}}{I_L} \approx 18200$$

따라서 단락용량이 1000보다 큰 범주에 속하므로, IEEE 519-1992 기준에 따라 직렬, 병렬 동조 필터를 사용한 고조파 저감 효과를 평가하기로 한다. 그림3-22은 그래프 비교한 것이고, 표8은 수치로 비교해 본 것이다.

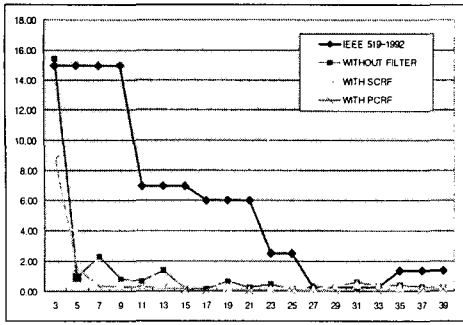


그림 14. 직렬, 병렬 동조필터 설치 전후와 IEEE 519-1992 기준과의 비교 그래프

fig. 14. Comparison between series-parallel resonant filters results and IEEE 519-1992

표 8. 직렬-병렬필터 설치 전후와 IEEE 519-1992 비교표

Table 8. Comparison between series-parallel resonant filters results and IEEE 519-1992

고조파 차수	Maximum harmonic current distortion in percent	WITHOUT FILTER[%]	WITH SCRF	WITH PCRF
3	15.00	15.44	5.21	8.73
5	15.00	0.91	3.81	1.56
7	15.00	2.3	1.74	0.34
9	15.00	0.83	0.4	0.31
11	7.00	0.66	1.19	0.33
13	7.00	1.37	0.91	0.21
15	7.00	0.17	0.11	0.14
17	6.00	0.14	0.59	0.06
19	6.00	0.65	0.27	0.11
21	6.00	0.27	0.09	0.08
23	2.50	0.45	0.14	0.09
25	2.50	0.17	0.27	0.06
27	0.25	0.24	0.14	0.06
29	0.25	0.3	0.35	0.03
31	0.25	0.6	0.45	0.08
33	0.25	0.35	0.35	0.06
35	1.40	0.43	0.33	0.07
37	1.40	0.29	0.16	0.1
39	1.40	0.25	0.28	0.15

IEC 61000-3-2 기준과 마찬가지로 직렬, 병렬 동조 필터를 구성했을 때도 IEEE 519 국제기준에 부합되는 것을 알 수 있다.

6. 결론

형광등용 전자식 안정기는 AC-DC로 변환하는 과정과 전압강하와 역률 보상을 위한 PFC부 전력변환 소자에 의해 고조파 발생을 알아보았다. 측정 데이터를 근거로 등가회로를 모델링하고 MATLAB Simulation을

하였으며, Simulation을 통하여 형광등 안정기에서 나오는 제3고조파와 실측 데이터 값이 일치함을 볼 수 있었다. 실측데이터를 가지고 직렬 동조 필터를 구성을 했을 때는 $C_1=5[\mu F]$, $L_1=80[mH]$ 전류 왜형율은 5.44[%]에서 5.21[%], 병렬 동조 필터로 구성을 했을 때는 $C_1=30[\mu F]$, $L_1=300[mH]$ 에서 전류 왜형율이 15.44[%]에서 8.9[%]로 저감 효과를 볼 수있는 최적의, C_1, L_1 을 값을 산정하여 LC Filter를 설계 및 적용하여 국제 고조파 관리 기준인 IEC Std 61000-3-2와 IEEE 519에 모두 적합함을 확인 할 수 있었다.

향후 전자식 안정기 내에 필터를 구성하여 고조파를 저감 할 수 있는 연구가 진행되어야 하고, 2등용 형광등 안정기에서 1등이 고장이 날 경우 고조파가 KS C 8100에서 규정되어 있는 고고조파(30%), 저고조파(20%)를 넘어서고 있다. 따라서, 한등 고장시 발생하는 고조파를 KSC 8100규정을 만족할 수 있는 고조파 대책을 세워야 겠다.

참고 문헌

- [1] AC. Liew "Excessive Neutral Currents in Three-Phase Fluorescent Lighting circuits" IEEE Transactions on Industry Applications July/August 1989.
- [2] MA. Dalla Costa, RN. So Prado, AR. Seidel and F.E. Bisogno " Performance Analysis of Electronic Ballasts for Compact fluorescent Lamp" IEEE, 2001
- [3] Tomas C. Jednacs "Power Quality Design Implications of High Frequency Lighting Ballasts and Controls" IEEE, 1991
- [4] 강윤모 " 교육용 건물에서 LC Filter를 이용한 고조파 저감에 관한 연구" 2003. 12
- [5] "전력계통의 고조파 장애 분석" 한국 전기 안전 공사. 1996
- [6] "고조파 저감 기술 현황과 전망" 대한 전기 학회 기술 조사보고서 제 7호. 1993
- [7] 김경철 "컴퓨터부하의 직렬 동조필터 적용 및 평가에 관한 연구"조명설비학회 5월. 2003
- [8] IEC "Electromagnetic Compatibility Limits for harmonic Current emissions" IEC 61000-3-2. 1995
- [9] IEEE "Recommended Practice and Requirements for Harmonics Control in electrical Power systems" IEEE Std 519-1992