

# 전자식 안정기의 고조파 저감 대책

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

홍순석\* · 오정석 · 유태군

(Soon-Seuk Hong · Jung-Suk Oh · Tae-Kun Yoo)

## 요 약

전자식 안정기는 형광등을 점등시키기 위하여 널리 사용되고 있다. 전자식 안정기의 실측을 통해 고조파 발생현황을 측정하고 고조파 해석용 등가회로를 모델링 하여 시뮬레이션을 하였다. 본 논문은 단상 부하의 고조파 해석용 등가회로 모델링과 설계 및 적용 시험을 하여 고조파를 저감 시키고, IEC 61000-3-2와 IEEE Std 519-1992를 근거로 평가하였다.

## 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 loads to evaluate a commercially available series resonant filter for the harmonic currents compensation based on the IEC 61000-3-2 and IEEE Std 519-1992 standards for limiting harmonic distortion.

Key Words : Series and Parallel Resonant Filters, Harmonic Currents, IEEE Std. 519-1992, IEC 61000-3-2

## 1. 서 론

전자식 안정기는 에너지절약 효과뿐만 아니라 고주파 점등으로 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. 본 논문에서는 전자식 안정기의 전력변환 소자들에 의

해서 발생 하는 고조파 발생량을 측정하고, 그것을 근거로 모델링 및 시뮬레이션을 하였으며, 직렬·병렬 필터를 구성하여 고조파 저감 효과를 알아보았다 [1~3].

## 2. 본 론

### 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 현장

\* 주저자 : 홍익대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수  
Tel : 041-860-2566, Fax : 041-860-7605  
E-mail : sshong@wow.hongik.ac.kr  
접수일자 : 2004년 11월 22일  
1차심사 : 2004년 11월 24일  
심사완료 : 2004년 12월 16일

## 전자식 안정기의 고조파 저감 대책

에서 주로 적용되고 있다. 직렬 동조 필터는 부하가 전압원일 때 고조파 저감 효과를 볼 수가 있고, 병렬 동조 필터는 부하가 전류원일 경우 저감 효과를 볼 수 있다.

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

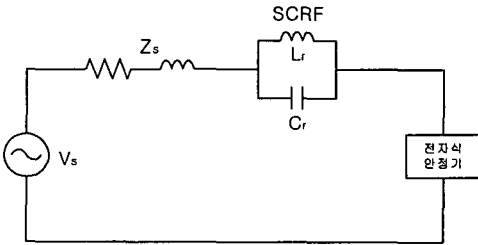


그림 1. 직렬 동조필터 적용 회로도  
Fig. 1. Circuit Diagram of a SCRFF Application

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. 설계 시에는 제거하고자 하는 고조파 차수( $h$ )에서 동조가 일어나도록 하면 된다.

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

여기서  $\omega_0$ 는 시스템의 각 주파수로  $377[\text{rad/s}]$ 이다. 부하의 주파수가 동조 주파수와 일치하면 동조 필터의 임피던스는 무한대가 된다. 따라서 주파수의 전류는 동조필터에서 차단(block)되는 원리이다.

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

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 0이 된다. 동조 주파수의 전류는 동조 필터로 유입(sink)되는 원리이다.

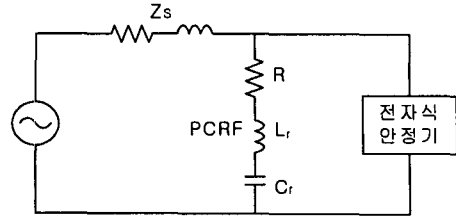


그림 2. 병렬 동조필터 적용 회로도  
Fig. 2. Circuit Diagram of a PCRF Application

## 3. 고조파 측정

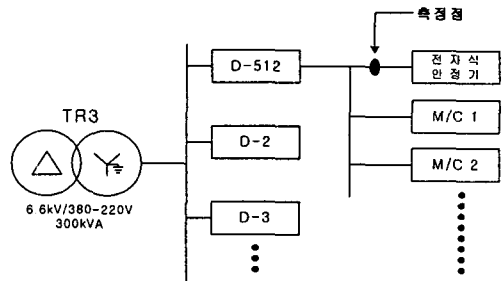


그림 3. 사례연구 시스템의 단선도  
Fig. 3. Single-Line Diagram of The Electrical Distribution System Under Study

그림 3은 홍익대학교 D동 변전실에서부터 측정점까지의 단선도이다.

전자식 안정기는 KS C-8100의 저 고조파 함유형(20[%])으로 정격 입력 전압 220[V], 주파수60[Hz], 입력 전류 0.38[A], 역률 93[%]의 FL 32 × 2등용 전자식 안정기이다. 고조파 측정 장비인 CA 8332 모델은 노트북과 연결시켜 50차 고조파까지의 전류(3000[A]), 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 (60[Hz])의 전압과 전류이고  $V_n, I_n$ 은 n차 고조파 전압과 전류를 나타낸다. 전자식 안정기는 점동 상태에 따라 변하므로 어느 한 순간의 전압, 전류 및 전력의 파형을 분석하여야 한다. 그림 4(a)는 필터 설치전의 전류 및 전압의 파형으로 2cycle(33[msec])동안 측정된 값이고, 그림 4(b)는 전류 스펙트럼이다.

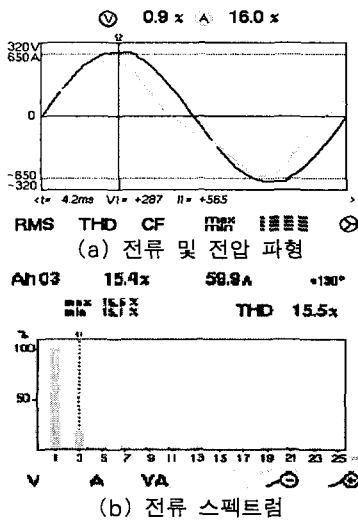


그림 4. 필터 설치전 전류 및 전압 파형과 전류 스펙트럼  
Fig. 4. Current and Voltage Waveforms, Current Spectrum

표 1. 전압 및 전류의 고조파 함유율  
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
THD[%]	0.9		16.0	

표 1은 전자식 안정기에서 발생하는 고조파를 실측한 값이다. 표 1을 보면 제 3고조파 발생량이 많음을 알 수 있다.

그림 4는 고조파 측정장비로 안정기에서 발생하는 고조파를 실측한 그림이다.

#### 4. 전자식 안정기 부하 모델링

고조파 해석용 등가회로를 구성하려면, 비선형 부하의 고조파 전압과 전류 측정이 우선되어야 한다. 측정점에서 본 전압원( $V_h$ )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.

$$I_L = I_1 + I_h \quad [A] \quad (4)$$

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

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

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

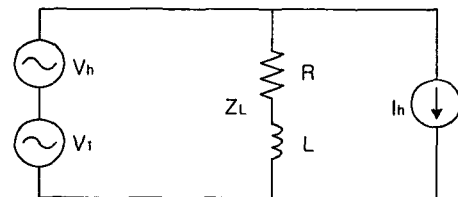


그림 5. 전자식 안정기 부하의 단상 부하의 등가회로  
Fig. 5. Single-phase Equivalent Circuit of electrical ballast

그림 6는 필터 설치전 고조파를 MATLAB으로 시뮬레이션 한 그림이고, 표 2는 필터 설치전의 전류 및 THD의 측정치와 시뮬레이션의 오차를 비교한 것이다.

전자식 안정기의 고조파 저감 대책

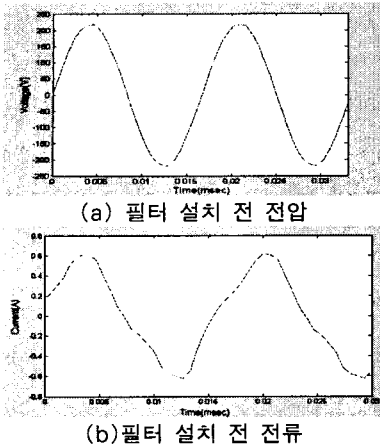


그림 6. 필터 설치전 시뮬레이션 전압 및 전류 파형  
Fig. 6. Current and Voltage Waveforms

표 2. 측정치와 시뮬레이션 비교표  
Table 2. Comparisons between Measurement and Simulation

구 분	측정치	Simulation	오차[%]
전류[A]	0.398	0.4032	0.13
THD[%]	16.00	15.91	0.0056

다음은 실측한 데이터를 토대로한 직렬·병렬 동조 필터 설계 값이다. 14[%]리액터를 택하였고, 전압 220[V], 주파수 60[Hz], 정격 전류 1[A]에서 각각  $C_r$ ,  $L_r$ 를 산정하였다.

$$V_L = 0.14 \times 220 = 30.8 [V] \quad (6)$$

$$X_L = \omega L = \frac{30.8 V}{1 A} = 30.8 [\Omega] \quad (7)$$

$$\therefore L_r = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{30.8}{2 \times 3.14 \times 60} \approx 81.748 [mH] \quad (8)$$

전자식 안정기 부하의 고조파 성분을 분석하면 주로 제 3, 5고조파가 많이 포함되어 있으므로 동조 주파수 4고조파를 선택하여 콘덴서 값을 구한다.

$$X_c = h^2 X_L = 4^2 \times 30.8 = 492.8 [\Omega] \quad (9)$$

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

공급 전압은 전압 왜형율이 1.0[%] 이내로 거의 정현파이다. 앞에서 구한  $C_r$ ,  $L_r$ 를 직렬 및 동조 필터를 구성하였으며, 이에 대한 실측값은 그림 7, 8과 같다.

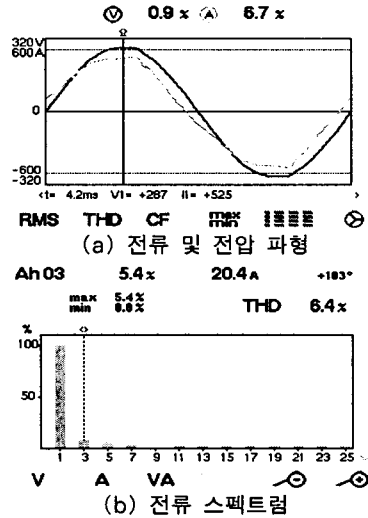


그림 7. 직렬 동조 필터 설치후 전류 및 전압 파형  
Fig. 7. Current and Voltage Waveforms With SCRF

그림 8은 병렬 동조 필터 구성 후 그래프이다.

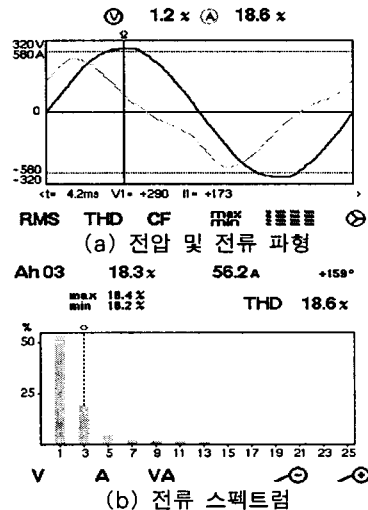
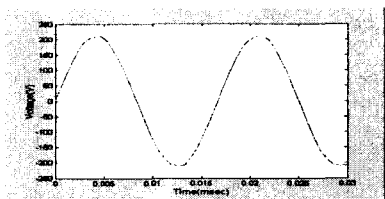
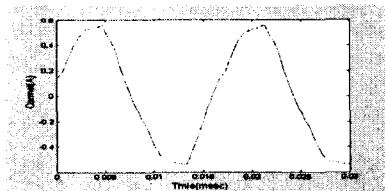


그림 8. 병렬 동조 필터 설치후 전류 및 전압 파형  
Fig. 8. Current and Voltage Waveforms With PCRF

그림 7에서와 같이  $C_r=5[\mu F]$ ,  $L_r=80[mH]$ 에서는 직렬 동조 필터에서는 제 3고조파를 저감 효과를 볼 수 있었다. 직렬 동조 필터 설계 값이 적정함을 알 수 있었다. 그러나 병렬 동조 필터인 경우 제 3고조파, THD가 18.3[%], 18.6[%]으로 필터 저감을 위해 동조 필터에서 발생한 주파수가 오히려 고조파 전류에서 합성이 되어 고조파가 필터 설치 전보다 더 발생하였다. 직렬·병렬 동조 필터 설치 후 결과를 보면 직렬 동조 필터에서 저감 효과를 볼 수가 있었다. 전자식 안정기는 전압원입을 알 수가 있다.



(a) 직렬 동조 필터 설치 후 전압 파형



(b) 직렬 동조 필터 설치 후 전류 파형

그림 9. 직렬 동조 필터 설치후 전압 및 전류 파형  
Fig. 9. Series Resonant Filter Simulated Voltage and Current waveform

그림 9는 직렬 동조 필터 설치 후 전압, 전류를 MATLAB으로 시뮬레이션한 그림이다.

표 3. 필터 설치후 측정치와 시뮬레이션 비교표  
Table 3. Comparisons between measurement and Simulation

구분	측정치	Simulation	오차[%]
전류[A]	0.385	0.3863	0.0033
THD[%]	6.7	6.88	0.026

표 3은 필터 설치후의 전류 및 THD와 시뮬레이션 값의 오차를 비교한 것이다. 측정치와 시뮬레이션에서 약간의 오차가 발생하는 것은 등가 모델에 고조파 함유율이 작은 것을 생략했기 때문이다.

## 5. 국제 고조파 관리 기준

### 5.1 IEC 61000-3-2

IEC 61000-3-2는 전자식 안정기와 같은 특별한 파형을 가진 전자 장비의 고조파 관리 기준이다. 전압은 204[V]이내, 유효전력은 600[W]이내, 부하 전류는 16[A]이내에 속하는 전자 장비를 일컫는다. 3차 고조파 전류의 크기를 회로의 역률(93[%])에 IEC 61000-3-2에서 정하는 30을 곱하여 산출하였고, 나머지 차수에 대해서는 IEC 기준을 적용하였다. 필터 설치 전·후의 고조파 저감 효과를 IEC 61000-3-2 기준으로 평가한다. 표 4는 수치로 비교한 것이고, 그림 10은 그래프로 비교한 것이다[4].

표 4. 직렬·병렬필터 설치 전후와 IEC 61000-3-2 비교표

Table 4. Comparison between series·parallel resonant filters results and IEC 61000-3-2

고조파 차수	IEC 61000-3-2	WITHOUT FILTER	WITH SCRF	WITH PCRF
3	27.9	15.44	5.44	18.36
5	10	0.91	3.81	0.91
7	7	2.3	1.74	0.71
9	5	0.83	0.4	2.3
11	3	0.66	1.19	0.83
13	3	1.37	0.91	0.31
15	3	0.17	0.11	0.66
17	3	0.14	0.59	0.21
19	3	0.65	0.27	1.37
21	3	0.27	0.09	0.16
23	3	0.45	0.14	0.17
THD[%]	-	16.00	6.7	18.6

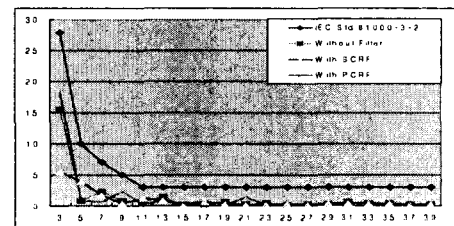


그림 10. 직렬, 병렬 동조필터 설치 전후와 IEC 61000-3-2 기준과의 비교 그래프  
Fig. 10. Comparison between series·parallel resonant filters results and IEC 61000-3-2

5.2 IEEE Std. 519-1992

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

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.

$$I_{sc} = \frac{300,000}{\sqrt{3 \times 380 \times 0.05}} \approx 9100[A] \quad (11)$$

$$SCR = \frac{I_{sc}}{I_L} \approx 18200 \quad (12)$$

따라서 단락용량이 1000보다 큰 범주에 속하므로, IEEE Std. 519-1992 기준에 따라 직렬, 병렬 동조 필터를 사용한 고조파 저감 효과를 평가하기로 한다. 표5는 IEEE Std. 519-1992 고조파 전류 제한치의 결정은 식11,12에서 구한 단락용량의 크기가 어느 범주에 속하느냐에 따라 고조파 전류의 제한치가 달라진다. IEEE Std. 519-1992에 규정하고 있는 각 차수의 고조파 전류 제한치는 표5와 같다. 그림 11은 IEEE Std. 519-1992의 관리기준을 직렬, 병렬 동조 필터 설치 전·후를 비교한 표와 그림이다[5].

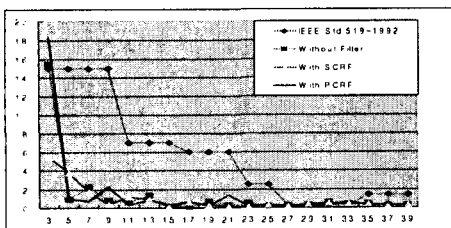


그림 11. 직렬, 병렬 동조필터 설치 전후와 IEEE Std. 519-1992 기준과의 비교 그래프

Fig. 11. Comparison between series · parallel resonant filters results and IEEE Std. 519-1992

그림 11을 보면 필터 설치전에는 제3고조파가

16.0[%]으로 IEEE Std. 519-1992의 전류 제한치를 초과하는 것을 알 수가 있다. 마찬가지로 병렬 동조 필터 구성 후에도 제3고조파가 측정시 보다 커진 것을 알 수 있었다. 전자식 안정기는 고조파 전압원인 것을 실험으로 확인 하였고, IEEE Std 519-1992 고조파 관리 기준과 비교하여 직렬 동조 필터의 고조파 전류저감 효과를 검증 할 수 있었다.

표 5. 직렬·병렬필터 설치 전후와 IEEE Std. 519-1992 비교표

Table 5. Comparison between series · parallel resonant filters results and IEEE Std. 519-1992

고조파 차수	Maximum harmonic current distortion in percent	WITHOUT FILTER [%]	WITH SCRF	WITH PCRF
3	15.00	15.44	5.44	18.36
5	15.00	0.91	3.81	0.91
7	15.00	2.3	1.74	0.71
9	15.00	0.83	0.4	2.3
11	7.00	0.66	1.19	0.83
13	7.00	1.37	0.91	0.31
15	7.00	0.17	0.11	0.66
17	6.00	0.14	0.59	0.21
19	6.00	0.65	0.27	1.37
21	6.00	0.27	0.09	0.16
23	2.50	0.45	0.14	0.17
THD[%]	-	16.00	6.7	18.6

6. 결 론

본 연구에서는 형광등용 전자식 안정기의 AC-DC로 변환하는 과정과 전압강하와 역률 보상을 위한 PFC부, 인버터 스위칭시 고조파가 발생원인을 분석하고, 측정 데이터를 근거로 등가회로를 모델링을 했다. Simulation을 통하여 형광등 안정기에서 나오는 제 3고조파와 실측 데이터 값이 일치함을 알 수 있었다. 실측데이터를 토대로  $C_f=5[\mu F]$ ,  $L_f=80[mH]$ 로 직렬 동조 필터를 구성을 했을 때 THD는 16.00[%]에서 6.7[%], 병렬 동조 필터로 구성을 했을 때는 THD 16.00[%]에서 18.6[%]로 증가하였다. 직렬 병렬 동조 필터를 설계, 적용하여본 결과 국제 고조파 관리 기준인 IEC 61000-3-2와 IEEE Std. 519-1992에 모두 적합함을 확인 할 수 있었다.

본 연구는 홍익대학교 2004년도 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

### References

- (1) A.C. Liew "Excessive Neutral Currents in Three-Phase Fluorescent Lighting circuits" IEEE Transactions on Industry Applications July/August 1989.
- (2) M.A. Dalla Costa, R.N. So Prado, A.R. 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) IEC "Electromagnetic Compatibility Limits for harmonic Current emissions" IEC 61000-3-2. 1995.
- (5) IEEE "Recommended Practice and Requirements for Harmonics Control in electrical Power systems" IEEE Std 519-1992.

### ◇ 저자소개 ◇

#### 홍순석 (洪淳錫)

1945년 12월 21일생. 1971년 인하공과대학(공학사). 1974년 인하대학교(석사). 1993년 홍익대학교(박사). 현재 홍익대학교 전자전기컴퓨터 공학부 교수.

#### 오정석 (吳政錫)

1950년 9월 13일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2003년 충남대학교 산업대학원 졸업. 1977~2004년 조달청. 2004년~현재 조달청 IT과장

#### 유태군 (俞泰軍)

1978년 8월 16일생. 2003년 홍익대학교 전자전기전공 졸업. 2003년~현재 홍익대학교 대학원 석사과정.