

비선형부하의 고조파전류 저감을 위한 직렬 및 병렬 동조필터에 관한 연구

(A Study on the Series and Parallel Resonant Filters for Harmonic Currents Reduction of Nonlinear Loads)

김경철* · 강윤모 · 백승현 · 김종욱

(Kyung - Chul Kim · Yun - Mo Kang · Seung - Hyun Paik · Jong - Uk Kim)

요 약

비선형 부하는 고조파 발생원으로 고조파 전압원과 고조파 전류원의 두종류로 분류된다. 직렬동조필터는 개인용 컴퓨터 부하와 같이 직류 캐패시터가 있는 비선형 부하로 고조파 전압원에 매우 효과적으로 고조파를 저감시킨다. 병렬동조필터는 교류 구동장치와 같이 직류 리액터가 있는 비선형 부하로 고조파 전류원에 적합하다. 본 논문에서는 직렬 및 병렬 동조 필터의 고조파 저감 특성과 비교를 검토하고 실험하였다. 국제 고조파 관리 기준인 IEC 1000-3-2 으로 직렬 및 병렬 동조필터의 고조파 저감 효과를 평가하고자 한다.

Abstract

This paper characterizes typical nonlinear loads into two types of harmonic sources, i.e., harmonic voltage source and harmonic current source. A series resonant filter is very effective in harmonic reduction for harmonic voltage source type of nonlinear loads such as personal computer loads with smoothing dc capacitors. A parallel resonant filter is suited for current source type of nonlinear loads such as ac drives with smoothing dc reactors.

General compensation characteristics and comparison of series and parallel resonant filters are given analytically and experimentally. Compliance with IEC Std 1000-3-2 has been evaluated for limiting harmonic distortion.

Key Words : Series and Parallel Resonant Filters, Harmonic Currents, IEC Std.1000-3-2

1. 서 론

교육용 건물에는 개인용 컴퓨터, 형광등, 반도체

* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605
E-mail : yangjier@hongik.ac.kr
접수일자 : 2003년 6월 20일
1차심사 : 2003년 7월 1일
심사완료 : 2003년 7월 22일

소자의 스위칭을 이용하는 전자장비, 교류 전동기 구동장치 등 비선형 부하가 많이 쓰이고 있다. 이들 부하는 고조파 전류를 발생시켜 전압파형왜곡, 과도한 중성선 전류, 측정오차, 컴퓨터 및 민감한 장비들의 오동작이나 일시정지등의 많은 고조파 장애를 일으킬 수 있다[1-2].

고조파를 발생시키는 장비는 고조파 전압원과 고조파 전류원으로 분류할 수 있다. 고조파 발생원에

따라 직렬동조필터와 병렬동조필터를 선택하여 적용시키면 효과적이다. 스위칭 모드 전원공급 장치는 dc 캐패시터를 사용하여 일정전압을 유지하는 대표적인 고조파 전압원이다. 싸이리스터 컨버터와 인버터를 이용하는 ac 구동장치는 dc 리액터에 의해 일정전류를 유지하는 대표적인 고조파 전류원이라 할 수 있다.

고조파 전류를 저감시키는 일반적인 방법으로는 동조 필터를 사용한다[3-6]. 본 논문에서는 직렬동조필터와 병렬동조필터를 컴퓨터부하와 유도전동기의 ac 구동장치에 적용하여 효과적인 고조파 전류저감대책을 알아보고자 한다. 또한 국제 고조파 관리 기준인 IEC Std 1000-3-2로 직렬 및 병렬 동조필터의 고조파 저감 효과를 평가한다.

2. 전압 및 전류형태의 고조파발생원

고조파를 발생시키는 장치는 크게 고조파 전압원과 고조파 전류원으로 구분할 수 있다. 고조파 발생원에 따라 적절한 고조파 저감장치를 적용하면 효과적이다.

고조파 전압원으로는 스위칭 모드 전원 공급 장치(SMPS, Switching Mode Power Supply)를 사용하는 개인용 컴퓨터(PC, Personal Computer)가 대표적이다. 그림 1은 PC의 등가회로를 나타낸다. dc 캐패시터 C_f 에 의해 일정 전압을 유지해 주므로 전압원으로 등가 모델링 할 수 있다.

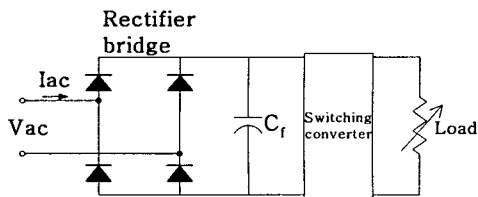


그림 1. 개인용 컴퓨터의 간략 회로도
Fig. 1. Simplified circuit diagram of a typical PC

고조파 전압원의 전류파형은 dc 캐패시터가 충전될 때 생기는 것으로 단상에서는 한 개의 산봉우리 형태(hump)가 생기고, 3상에서는 2개가 반주기동안 나타난다. 전류왜형율(THD, Total Harmonic Distortion)

은 일반적으로 100[%]이상이고, 주로 제 3, 5, 7 등의 고조파가 포함된다.

고조파 전류원으로는 대표적인 장비로서 싸이리스터 컨버터를 사용하는 ac 전동기 구동장치가 있다. 그림 2는 IGBT(Insulated-Gate Bipolar Transistors)를 사용한 유도 전동기의 구동장치를 나타낸다. dc 리액터 L_f 에 의해 일정전류를 유지해 주므로 전류원으로 등가 모델링 할 수 있다. 고조파 전류 파형은 펄스(pulse)형태이고, 제 5, 7, 11, 13 등의 고조파로 전류 왜형율은 30[%]정도이다.

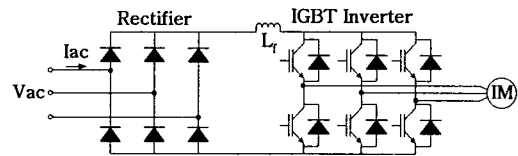


그림 2. 교류전동기 구동장치의 간략 회로도
Fig. 2. Simplified circuit diagram of a typical ac motor drive

3. 직렬 및 병렬 동조필터

고조파 전류를 저감시키는 수단으로 동조 필터가 널리 쓰이고 있다. 동조필터는 가격이 저렴하고, 설치의 용이성, 견고성, 효율성의 장점들이 있어 현장에 주로 적용되고 있다.

그림 3은 컴퓨터 부하에 적용한 직렬 동조필터(SCRF, Series Connected Resonant Filter)이다.

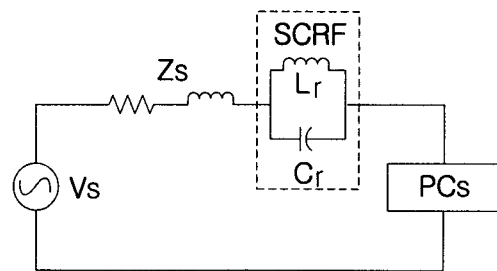


그림 3. 직렬 동조필터 적용 회로도
Fig. 3. Circuit diagram of a SCRF application

그림 3에서 V_s 는 공급전압[V], Z_s 는 전원측 임피던스[Ω]이다.

직렬 동조필터는 리액터(Lr)와 콘덴서(Cr)가 병렬로 연결 되어있다. 동조필터의 설계 값은 부하에 따라 정해진다. 제거하고자 하는 고조파 차수(h)에서 동조가 일어나도록 하면 된다. 즉,

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

여기서 ω_0 는 시스템 각주파수로 377[rad/s]이다. 부하의 주파수가 동조 주파수와 일치하면 동조필터의 임피던스는 무한대가 된다. 따라서 동조 주파수의 전류는 동조필터에서 차단(block)되는 원리이다. 본 논문에서는 상용화된 제품[7]을 컴퓨터 부하에 적용하고자 한다. 동조 필터의 용량은 컴퓨터 8대 정도를 사용할 수 있는 6[A]이다.

직렬 동조필터 설계 값은 20[%]리액터를 택한다. 220[V]전압, 60[Hz]의 주파수, 6[A]정격전류에서 구하면 된다.

$$\begin{aligned} V_L &= 0.2 \times 220 = 44 [V] \\ X_L &= \omega L = \frac{44V}{6A} = 7.3 [\Omega] \\ \therefore L_r &= \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{7.3}{2 \times 3.14 \times 60} \times 10^3 \\ &\approx 19.5 [mH] \end{aligned}$$

컴퓨터 부하의 고조파 성분을 분석하면 주로 제 3 고조파(90%)와 제 5고조파(75%)가 많이 포함되어 있으므로, 동조 주파수를 3.8고조파로 선택하여 콘덴서 값을 구한다.

$$\begin{aligned} X_C &= h^2 X_L = 3.8^2 \times 7.3 = 105.4 [\Omega] \\ \therefore C_r &= \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 60 \times 105.4} \times 10^6 \\ &\approx 25 [\mu F] \end{aligned}$$

병렬 동조필터(PCRF, Parallel Connected Resonant Filter)는 전류형 고조파 발생원에 적용한 사례를 그림 4에서 보여주고 있다.

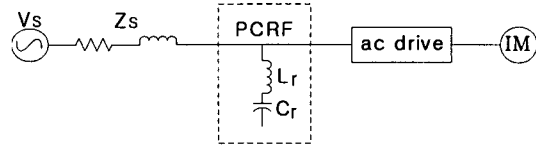


그림 4. 병렬 동조필터 적용 회로도
Fig. 4. Circuit diagram of a PCR application

병렬 동조필터는 리액터(Lr)와 콘덴서(Cr)가 직렬로 연결되어 있다. 동조 필터의 설계 값은 직렬 동조필터와 같은 원리이다. 즉, 제거 하고자하는 차수(h)에서 동조가 일어나도록 구성한다. 부하의 주파수가 동조 주파수와 일치하면 동조 필터의 임피던스는 영이 된다. 따라서 동조 주파수의 전류는 동조 필터로 유입(sink)되는 원리이다.

이상적인 ac 구동장치의 고조파전류 함유율(THD)은 주로 제 5고조파(20%), 제 7고조파(14%)가 많이 포함된다. 본 논문에서는 편의상 직렬 동조필터의 리액터와 콘덴서를 직렬로 연결시켜 병렬 동조필터로 사용하였다.

4. 사례연구

직렬 및 병렬 동조필터를 컴퓨터 부하와 유도전동기 부하에 적용시켜 동조필터의 특성과 비교 검토하고, 국제 고조파 관리기준인 IEC Std 1000-3-2[8]에 적용시켜 동조필터의 고조파 전류저감 효과를 알아보고자 한다.

고조파 측정 장비는 HIOKI 모델 3166[9]를 사용하였다. 그림 5는 고조파 측정 장비를 포함한 사례연구 시스템을 보여준다.

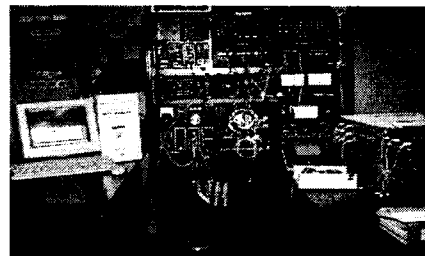


그림 5. 직렬 및 병렬 동조필터 적용을 위한 사례 연구 시스템
Fig. 5. Experimental system for SCR and PCR application

비선형부하의 고조파전류 저감을 위한 직렬 및 병렬 동조필터에 관한 연구

컴퓨터 부하는 7대의 펜티엄IV, 1GHz CPU, 200[V], 최대 250[W]를 소비하는 비선형 부하이다. 그림 6은 실측된 전압(VTHD=1.7%)과 전류(ITHD=135%)파형이고, 표 1은 제 39고조파까지 수치로 나타낸다.

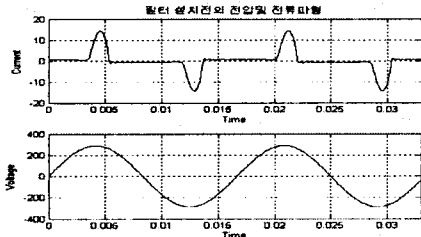


그림 6. 고조파 전압원의 측정된 전압 및 전류 파형
Fig. 6. Measured voltage and current waveforms for a harmonic voltage source

표 1. 고조파 전압원의 전압 및 전류 고조파 함유율
Table 1. Harmonic spectrums of voltage and current waveforms for a harmonic voltage source

고조파차수 (h)	전압		전류	
	크기(V)	위상(°)	크기(A)	위상(°)
1	204.04	0	2.901	3.8
3	1.87	9.34	2.625	160.29
5	2.02	-148.7	2.172	-35.98
7	1.17	27.64	1.578	126.72
9	0.89	143.51	0.979	-73.5
11	0.77	-72.5	0.456	78.7
13	0.74	146.9	0.164	-163.93
15	0.39	156.44	0.225	-80.58
17	0.2	-55.04	0.226	66.74
19	0.35	104.15	0.226	-142.2
21	0.14	-120.25	0.132	-1.56
23	0.14	60.8	0.088	110.78
25	0.06	94.4	0.106	-136.4
27	0.13	-66.5	0.119	8.01
29	0.31	48.47	0.11	150.7
31	0.23	-148.2	0.073	-70.2
33	0.18	-84.6	0.057	31.41
35	0.29	30.25	0.073	151.47
37	0.19	135.9	0.072	-64.48
39	0.04	-104.6	0.05	81.87
THD(%)	1.67		135.95	

전류형부하와 같은 특별한 파형을 가진 비선형 장비는 IEC Std 1000-3-2의 Class D로 분류된다. 특별한 파형이란 그림 7과 같은 유형의 고조파 전류를 일컫는다.

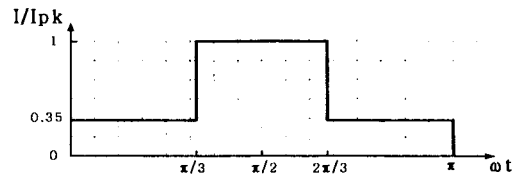


그림 7. Class D에 속하는 특별한 입력전류 파형
Fig. 7. Envelope defining input current "special waveshape" of Class D

컴퓨터 부하의 직렬 및 병렬 동조 필터를 사용한 고조파 저감 효과를 IEC Std 1000-3-2 Class D 기준으로 평가하기로 한다. 그림 8은 그래프로 비교한 것이고, 표 2는 수치로 비교해 보았다.

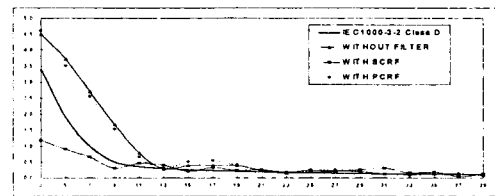


그림 8. 동조필터 설치 전후와 IEC Std.1000-3-2 Class D 기준과의 비교 그래프

Fig. 8. Comparison between resonant filter results and IEC 1000-3-2 Class D limits

표 2. 동조필터 설치 전후와 IEC Std.1000-3-2 Class D 기준과의 비교표

Table 2. Comparison between resonant filters results and IEC 1000-3-2 Class D limits

고조파 차수(h)	IEC1000-3-2 limits (mA/W)	Without filter	With SCRF	With PCRF
3	3.400	4.503	1.184	4.630
5	1.900	3.726	0.897	3.513
7	1.000	2.707	0.661	2.560
9	0.500	1.679	0.300	1.523
11	0.350	0.782	0.463	0.661
13	0.296	0.277	0.397	0.316
15	0.257	0.386	0.212	0.510
17	0.226	0.388	0.322	0.541
19	0.203	0.388	0.234	0.414
21	0.183	0.226	0.260	0.235
23	0.167	0.151	0.176	0.171
25	0.154	0.182	0.243	0.225
27	0.143	0.204	0.220	0.250
29	0.133	0.189	0.251	0.208
31	0.124	0.125	0.303	0.124
33	0.117	0.098	0.153	0.126
35	0.110	0.125	0.188	0.153
37	0.104	0.123	0.038	0.131
39	0.099	0.086	0.119	0.068
ITHD(%)	-	135.95	39.23	105.94

컴퓨터 부하의 고조파 전류 함유율은 135[%]에서 직렬 동조필터 설치 후에는 39[%]로 대폭 감소하였고, 병렬 동조필터 설치 후에는 105[%]로 조금 감소하여 별 효과가 없음을 알 수 있다. 컴퓨터 부하는 고조파 전압 발생원인 것을 실험으로 확인하였고, IEC Std 1000-3-2 Class D 고조파 관리기준과 비교하여 직렬 동조필터의 고조파 저감효과를 간접적으로 검증할 수 있다.

고조파 전류원으로 유도전동기(IM, Induction Motor)의 0.5[Hp]유도전동기와 IGBT 인버터를 사용하는 ac 구동장치는 Lab-Volt 실험장치[10]이다.

그림 9는 실측된 전압($V_{THD}=1.0\%$)과 전류($I_{THD}=32\%$) 파형이고, 표 3은 제 39 고조파까지 수치로 나타낸다. 3상평형 부하이므로 A상에 대한 데이터만 나타내기로 한다.

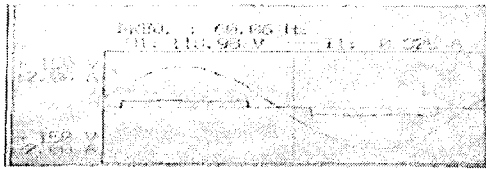


그림 9. 고조파 전류원의 측정된 전압 및 전류 파형
Fig. 9. Measured voltage and current waveforms for a harmonic current source

표 3. 고조파 전류원의 전압 및 전류의 고조파 함유율
Table 3. Harmonic spectrums of voltage and current waveforms for a harmonic current source

고조파차수 (h)	전압		전류	
	크기(V)	위상(°)	크기(mA)	위상(°)
1	118.29	0	19.0	-0.37
3	0.12	-83.9	0.532	-94.4
5	0.79	83.92	3.946	154.31
7	0.45	-79.67	3.184	-161.53
9	0.28	-119.67	0.160	94.43
11	0.21	-36.35	1.873	-6.42
13	0.29	173.17	1.562	5.52
15	0.21	105.3	0.07	-168.54
17	0.29	-165.72	0.055	173.78
19	0.18	-82.71	1.028	177.25
21	0.1	10.71	0.067	28.61
23	0.08	92.1	0.912	-9.15
25	0.19	121.85	0.787	-7.35
27	0.07	-122.58	0.091	-164.47
29	0.01	-159.7	0.728	168.28
31	0.15	-15.17	0.595	171.42
33	0.08	112.43	0.044	22.21
35	0.01	171.48	0.631	-16.44
37	0.1	173.89	0.505	-15.84
39	0.07	-51.93	0.07	-159.56
THD(%)	1.0		32.23	

IEC Std.1000-3-2 에는 비선형 부하의 정격 전류가 16[A] 이하인 장비의 고조파 전류 한계치를 규정하고 있다. ac 구동장치와 같은 3상평형 부하인 경우는 Class A로 분류 된다. 그림 10은 ac 구동장치의 직렬 및 병렬 동조필터를 사용한 고조파 저감 효과를 IEC Std.1000-3-2 Class A기준으로 평가한 그래프이고, 표 4는 수치로 비교해 보았다.

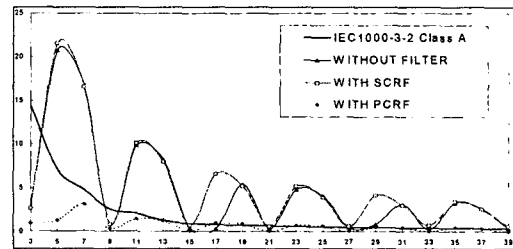


그림 10. 동조필터 설치 전후와 IEC Std.1000-3-2 Class A 기준과의 비교 그래프
Fig. 10. Comparison between resonant filters results and IEC 1000-3-2 Class A limits

표 4. 동조필터 설치 전후와 IEC Std.1000-3-2 Class D 기준과의 비교표
Table 4. Comparison between resonant filters results and IEC 1000-3-2 Class D limits

고조파 차수(h)	IEC1000-3-2 limits I_h/I_1 (%)	Without filter	With SCRF	With PCRF
3	14.375	2.80	2.63	0.98
5	7.125	20.77	21.59	1.30
7	4.813	16.76	16.60	3.14
9	2.500	0.84	0.86	0.39
11	2.063	9.86	10.14	1.49
13	1.313	8.22	8.0	1.32
15	0.938	0.37	0.74	0.09
17	0.827	0.29	6.66	1.0
19	0.740	5.41	5.24	0.95
21	0.670	0.35	0.7	0.04
23	0.611	4.80	5.14	0.73
25	0.563	4.14	3.93	0.66
27	0.521	0.48	0.59	0.04
29	0.485	0.83	4.18	0.57
31	0.454	3.13	3.02	0.47
33	0.426	0.23	0.75	0.04
35	0.402	3.32	3.42	0.48
37	0.380	2.66	2.56	0.39
39	0.361	0.37	0.6	0.01
ITHD(%)	-	32.23	32.83	4.52

ac 구동장치의 고조파 전류 함유율은 32[%]에서 병렬 동조필터 설치 후에는 4[%]로 대폭 감소하였

고, 직렬 동조필터 설치 후에는 32[%]로 거의 효과가 없음을 알 수 있다. ac 구동장치는 고조파 전류 발생원인 것을 실험으로 확인 하였고, IEC Std,1000-3-2 Class A고조파 관리 기준과 비교하여 병렬 동조필터의 고조파 전류저감 효과를 간접적으로 검증할 수 있었다.

5. 결 론

오늘날 반도체 산업의 발달로 컴퓨터와 같은 비선형 부하가 많이 증가하고 있다. 비선형 부하는 고조파를 발생시키고, 여러 가지 고조파 장애를 일으키므로 고조파 전류에 대한 해석이 요구된다.

고조파 전류를 저감시키는 수단으로 수동 동조필터가 가장 널리 쓰이고 있다. 효과적으로 고조파 전류를 저감시키기 위해서는 고조파 발생원의 특성을 파악할 필요가 있다. 고조파 발생원은 고조파 전압원과 고조파 전류원으로 구분할 수 있다.

사례연구로 대표적인 고조파 전압원인 컴퓨터 부하에 직렬 동조필터를 적용하여 전류 왜형율을 135[%]에서 39[%]로 저감시키고, 국제 고조파 관리 기준인 IEC Std 1000-3-2에도 적합함을 확인할 수 있었다. 대표적인 고조파 전류원인 ac 구동장치를 쓰는 유도전동기 부하에 병렬 동조필터를 적용하여 전류 왜형율을 32[%]에서 4[%]로 저감시키고, IEC Std 1000-3-2기준에 적합한 만족할만한 고조파 저감 효과를 얻었다.

향후 여러 가지 비선형 부하의 고조파 특성을 파악하고 고조파 특성에 따른 체계적인 직렬 및 병렬 동조필터 설계에 관해 연구할 계획이다.

본 연구는 전력산업 기술개발사업으로 수행되었음.

References

- (1) H. V. Aintablian and H. W. Hill, "Harmonic Currents Generated by Personal Computer and their Effects on the Distribution System Neutral Current", IEEE Transactions on Industry Applications, 1993.
- (2) W. M. Grady and et al, "Estimating the Net Harmonic Currents Produced by Selected Distributed Single-Phase Loads: Computer, Televisions, and Incandescent Light Dimmers", IEEE Power Engineering Society, Winter Meeting, 2000.
- (3) L. M. Tolbert, and et al, "Evaluation of Harmonic Suppression Devices", IEEE Industry Applications Conference, 1996.
- (4) E. Maset, and et al, "Harmonics Reduction in Low-cost Power Supplies", IEEE Power Electronics Congress, 1996.
- (5) J. S. Lai and T. key, "Effectiveness of Harmonic Mitigation Equipment for Commercial Office Buildings", IEEE Transactions on Industry Applications, 1996.
- (6) F. Z. Peng and et al, "A Series LC Filter for Harmonic Compensation of AC Drives", IEEE Power Electronic Specialists Conference, 1999.
- (7) 단상고조파 저감장치(Single-phase Harmonics Eliminating Device), (주)피에스티테크, 2001.
- (8) IEC 1000-3-2, Electromagnetic Compatibility Limits for harmonic current emissions, March 1995.
- (9) HOKI model 3166 Clamp on Power Hitester, HOKI E. E. Corporation, 1997.
- (10) Lab-Volt Power Electronics Equipment, 2002.

◇ 저자소개 ◇

김경철 (金慶哲)

1954년 1월 20일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1977~1982 국방과학연구소 연구원. 1982~1984 NMSU 전기공학과 석사. 1984~1988 UTA 전기공학과 박사. 1988~1991 한국전기연구소 선임연구원. 1991~현재 홍익대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수.

강윤모 (姜倫模)

1977년 2월 26일생. 2002년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2002년~현재 홍익대학교 대학원 석사과정.

백승현 (白承鉉)

1975년 7월 13일생. 2002년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2003년~현재 홍익대학교 대학원 석사과정.

김종욱 (金種郁)

1972년 5월 21일생. 2000년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2002년 홍익대학교 대학원 졸업. 2002~현재 동양산전(주) 부설 접지설비연구소 연구원.