

조명부하의 중성선 영상전류 저감장치 분석 및 적용에 관한 연구

(A Study on the Analysis and Application of Neutral Line Zero Sequence Currents Reduction Device in Lighting Loads)

김경철* · 이일무 · 정영호 · 백승현

(Kyung-Chul Kim · Il-Moo Lee · Yung-Ho Jung · Seung-Hyun Paik)

요 약

현대 사회 전반에 걸쳐 조명설비와 같은 비선형 부하가 증가하여, 중성선에는 많은 고조파 전류가 흐른다. 3상 4선식 배전계통을 채용하는 중성선에 과도한 고조파 전류가 흐르면 여러 가지 고조파 장애를 일으킨다. 중성선 고조파 저감 대책으로 지그재그 변압기를 이용하는 영상 필터가 널리 쓰이고 있다. 본 논문에서는 상용화된 중성선 영상 전류 저감장치를 분석하고, 고조파를 저감시키기 위해서 조명 부하에 적용하고자 한다. 실측한 값과 MATLAB으로 시뮬레이션한 값을 수치와 그래프로 비교해 보았다.

Abstract

With the proliferation of nonlinear loads such as lighting facilities in all of modern society high neutral harmonic currents have been observed. High neutral currents in three-phase four-wire distribution systems can cause lots of harmonic problems. The most common solution of neutral harmonic currents reduction is a zero phase sequence filter using zig-zag transformer. This paper analyzes a commercially available neutral line zero sequence currents reduction device and applies the equipment to lighting loads for eliminating harmonics. Experimental results are compared numerically and graphically with simulation results through the use of MATLAB.

Key Words : Neutral Harmonic Currents, Total Harmonic Distortion, Zero sequence Currents, Reduction Device

1. 서 론

조명부하와 같은 비선형 부하가 널리 쓰이고 있다 [1]. 이들 비선형 부하는 3상 4선식 배전시스템을 채용하는 중성선에 고조파를 발생시키는 주요 원인이다.

된다[2].

과다한 중성선 전류는 중성선 도체의 과열, 배전 변압기의 성능저하, 전압의 왜곡, 통신선 잡음, 전기 전자 장비의 오동작등 고조파 장애를 일으키게 된다.

중성선의 고조파 전류를 저감시키는 일반적인 방법으로는 영상 전류 저감장치[3-5]를 사용한다. 지그재그 변압기를 이용하여 영상 임피던스를 작게하여 영상분(3배수 고조파)전류를 상쇄시키는 원리이다.

본 논문에서는 상용화 되어있는 영상 전류 저감장

* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605
E-mail : yangjier@wow.hongik.ac.kr
접수일자 : 2003년 10월 1일
1차심사 : 2003년 10월 9일
심사완료 : 2003년 10월 31일

제[6]를 상암 월드컵 경기장의 조명부하에 적용하여 중성선 영상전류 저감효과를 알아보고, MAT-LAB[7]으로 컴퓨터 시뮬레이션 하고자 한다.

2. 고조파 측정

고조파 전압 및 전류 측정은 서울 상암 월드컵 경기장내의 한 분전반에서 수행하였다.

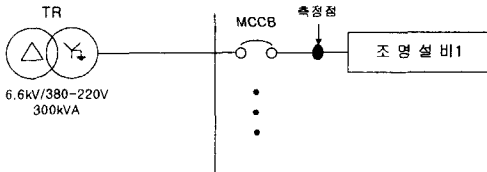


그림 1. 사례연구 배전 시스템
Fig. 1. Single line diagram of the distribution system under study

그림 1은 사례연구 배전시스템의 단선도이다. 주 변압기는 6.6[kV]의 공급전압을 2차측에 380-220[V] 전압으로 낮추어 주로 조명부하에 전력을 공급하고 있다.

경기장 조명은 선수, 심판, 그리고 경기 관계자들이 가능한 최선의 경기를 할 수 있도록 2000[lx] 이상의 조도를 확보할 수 있는 조명 시설을 갖추고 있어야 한다. 조명설비는 필립스사의 아레나버전 MVF 403/2[kW] 모델 264개가 48[m] 높이의 좁은 통로에서 비춰지고 있다. 표 1은 서울 상암 월드컵 경기장의 개요를 설명하고 있고, 그림 2는 야경을 보여주고 있다.

표 1. 상암 월드컵 경기장 개요
Table 1. Summary of Sangam world-cup stadium

| 경기장 개요 | |
|-----------------|-----------------------------------|
| 구장 형태 | 축구 전용 경기장 |
| 관중 수용능력 | 64,677 석 규모 |
| 국제 경기 수준 | 고화질 TV 방영 가능 |
| Field dimension | 110[m] × 70[m] |
| 경기장 외관 | 큰 방패연 모양으로 한강의 이미지를 상징하는 황포돛대의 형상 |

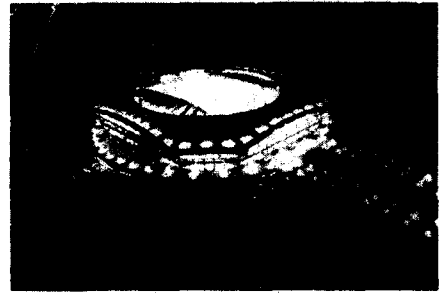


그림 2. 상암 월드컵 경기장의 야경
Fig. 2. A night scene of Sangam world-cup stadium

고조파 측정장비는 BMI 모델 3030A[8]를 사용하여 측정하였다. 그림 3의 BMI 모델 3030[A]는 노트북과 연결시켜 50차 고조파까지의 전류, 전압 및 전력을 측정하여 모니터에서 확인하고 컴퓨터에 데이터를 저장할 수 있다.

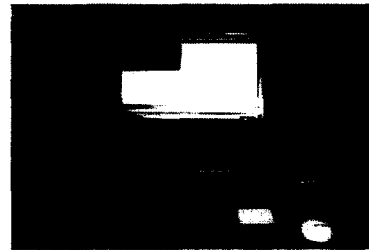


그림 3. BMI 측정 장비
Fig. 3. BMI measurement equipment

부하는 시시각각으로 변화하므로 어느 한 순간의 전압과 전류의 파형을 분석하여 고조파 함유율, 중성선 전류를 계산한다. 그림 4는 측정된 전압 파형이고, 그림 5는 전류 파형이다.

전압 파형은 비선형 부하로 인하여 고조파가 많이 포함되어 있음을 알 수 있다. 표 2는 고조파 함유율 분석표로 제 3고조파가 상대적으로 크게 포함되어 있다. VA1에서 첨자 A는 A상을 나타내고, 숫자 1은 기본파를 의미한다. 측정된 실효치 상전압은 다음과 같다.

$$V_{AN} = 213.5 [Vrms]$$

$$V_{BN} = 218.4 [Vrms]$$

$$V_{CN} = 214.6 [Vrms]$$

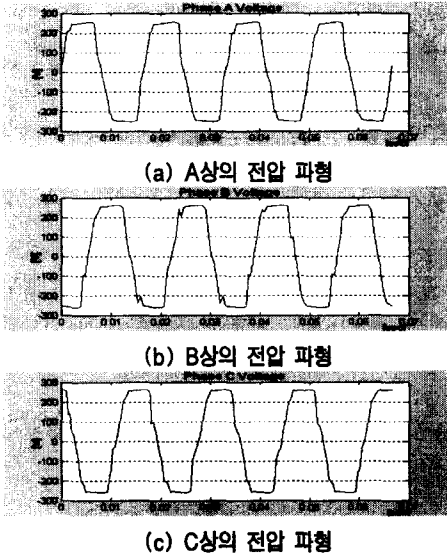


그림 4. 측정된 전압 파형
Fig. 4. Measured voltage waveforms

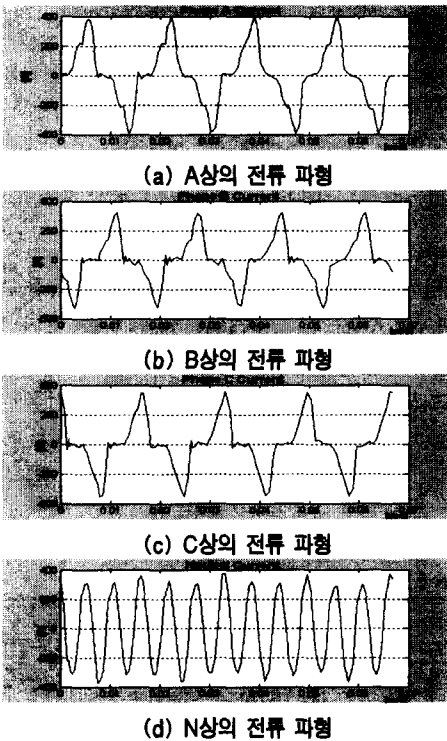


그림 5. 측정된 전류 파형
Fig. 5. Measured current waveforms

표 2. 고조파 전압 측정
Table 2. Harmonic spectrum of voltage waveforms

| 고조파 차수 | A상 | | B상 | | C상 | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 크기(%) | 위상(°) | 크기(%) | 위상(°) | 크기(%) | 위상(°) |
| 1 | 100.0 | 0 | 100 | -120 | 100 | 121 |
| 3 | 17.3 | 10 | 16.4 | 10 | 13.1 | 13 |
| 5 | 3.2 | 107 | 1.4 | -115 | 3.3 | 42 |
| 7 | 4.8 | 166 | 4.5 | 82 | 3.7 | -30 |
| 9 | 3.8 | -160 | 3.9 | -147 | 2.5 | -104 |
| 11 | 2.7 | -119 | 0.4 | -151 | 0.4 | -93 |
| 13 | 1.4 | -53 | 3.8 | -88 | 3.0 | -155 |
| 15 | 2.7 | 16 | 3.1 | 26 | 2.4 | 90 |
| 17 | 3.2 | 33 | 1.0 | -101 | 0.6 | 103 |
| 19 | 2.2 | 57 | 3.3 | 45 | 2.0 | 20 |
| 21 | 1.9 | 117 | 2.8 | 178 | 1.2 | -43 |
| 23 | 2.3 | 140 | 2.2 | -24 | 2.3 | -91 |
| 25 | 1.6 | 145 | 1.8 | 105 | 2.5 | -178 |
| 27 | 0.3 | -156 | 0.3 | 173 | 2.6 | 114 |
| 29 | 0.8 | -78 | 1.0 | 154 | 3.0 | 17 |

주) $V_{A1} = 209.3$ [Vrms], $V_{THD,A} = 19.9$ [%]
 $V_{B1} = 214.5$ [Vrms], $V_{THD,B} = 18.9$ [%]
 $V_{C1} = 211.7$ [Vrms], $V_{THD,C} = 15.7$ [%]

표 3. 고조파 전류 측정
Table 3. Harmonic spectrum of currents waveforms

| 고조파 차수 | A상 | | B상 | | C상 | | N상 | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 크기 (%) | 위상 (°) | 크기 (%) | 위상 (°) | 크기 (%) | 위상 (°) | 크기 (%) | 위상 (°) |
| 1 | 100.0 | -16 | 100 | -137 | 100 | 106 | 100 | -66 |
| 3 | 39.8 | 114 | 48 | 109 | 50.6 | 126 | 835.0 | -67 |
| 5 | 18.6 | 175 | 21.9 | -47 | 17.6 | 95 | 119.8 | -44 |
| 7 | 12.0 | -68 | 13.9 | -179 | 14.3 | 69 | 77.8 | -35 |
| 9 | 3.6 | -85 | 5.9 | -53 | 5.2 | 34 | 117.4 | 138 |
| 11 | 5.3 | -1 | 4.5 | 179 | 1.9 | -33 | 41.3 | 139 |
| 13 | 3.2 | 98 | 5.9 | -1 | 4.8 | -99 | 74.9 | 145 |
| 15 | 1.8 | 88 | 3.1 | 116 | 3.6 | -140 | 48.9 | -43 |
| 17 | 4.3 | 144 | 4.6 | -11 | 2.2 | -154 | 14.6 | -78 |
| 19 | 0.8 | -124 | 3.1 | 146 | 1.9 | 87 | 55.9 | -64 |
| 21 | 1.8 | 178 | 3.6 | -78 | 2.7 | 64 | 5.0 | 1 |
| 23 | 3.5 | -123 | 3.5 | 77 | 2.5 | 1 | 20.7 | -145 |
| 25 | 0.7 | -98 | 1.8 | 155 | 2.6 | -64 | 23.5 | 57 |
| 27 | 0.4 | 5 | 0.7 | 19 | 2.6 | -152 | 23.6 | 30 |
| 29 | 0.8 | 14 | 1.9 | -98 | 3.0 | 110 | 18.6 | -64 |

주) $I_{A1} = 182.0$ [Arms], $I_{THD,A} = 47.2$ [%]
 $I_{B1} = 171.7$ [Arms], $I_{THD,B} = 55.8$ [%]
 $I_{C1} = 189.6$ [Arms], $I_{THD,C} = 56.7$ [%]
 $I_{N1} = 16.2$ [Arms], $I_{THD,N} = 1848.4$ [%]

전류파형은 비선형 부하로 인하여 고조파가 많이 포함되어 있음을 그림 5에서 알 수 있다. 고조파 함유율 분석표는 표 3에 간추려 놓았다.

주로 제 3,5,7 고조파가 많이 포함되어 있다. 작수과 고조파 함유율은 홀수과 고조파 함유율에 비해 상대적으로 값이 작아 생략한다. 예측한대로 중성선에는 제 3고조파가 1848[%] 포함되어 있다. 측정된 실효치 전류는 다음과 같다.

$$I_A = 201.1 [Arms]$$

$$I_B = 197.7 [Arms]$$

$$I_C = 218.1 [Arms]$$

$$I_N = 254.3 [Arms]$$

3. 영상 전류 저감장치

중성선 영상 저감 장치는 그림 6과 같이 같은 철심에 2개의 권선을 반대방향으로 감은 것으로 지그재그 변압기의 원리를 이용한다.

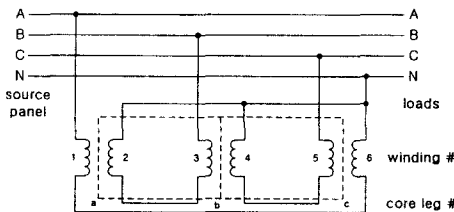


그림 6. 영상전류 저감장치 개오
Fig. 6. Zero sequence current filter scheme

표 4. 영상 전류 저감장치 알고리즘
Table 4. Zero sequence currents filter algorithm

| Phase Sequence | A | B | C |
|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Zero | $A^\circ - C^\circ$ | $B^\circ - A^\circ$ | $C^\circ - B^\circ$ |
| Positive | $A+ + C+$ | $B+ + A+$ | $C+ + B+$ |
| Negative | $A- + C-$ | $B- + A-$ | $C- + B-$ |

영상분은 위상을 상호 반대로 하여 상쇄되게 하였으며 정상, 역상분은 벡터 합성이 되게 한 것이다. 즉 영상 임피던스는 작게되어 영상분(3배수 고조파)은 필터에 흡수되게 설계되었다. 표 4는 영상 전류 저감 장치의 알고리즘을 간추려 놓았다. A° 는 A상의 영

상분, A^+ 는 A상의 정상분 A^- 는 A상의 역상분을 각각 나타낸다.

4. 영상 전류 저감장치의 적용

영상 전류 저감장치는 상용화된 제품(ZED, Zero sequence harmonic currents Eliminating Device)을 상암 월드컵 경기장의 조명 부하에 적용시켜 ZED설치후의 고조파를 측정하고 MATLAB으로 시뮬레이션한 값과 비교한다.



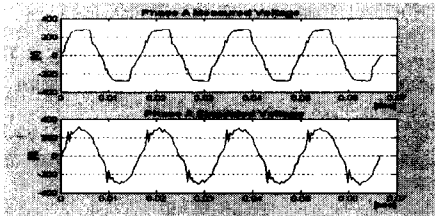
그림 7. ZED 설치
Fig. 7. ZED application

그림 7은 조명 부하의 분전반에 설치된 ZED를 나타낸다. 사용된 ZED 사양은 3상, 380[V], 300[A], 60[Hz] 이다.

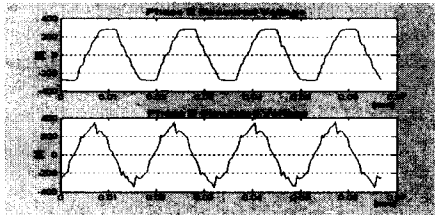
그림 8은 ZED설치후의 전압파형으로 실측한 파형과 MATLAB으로 시뮬레이션한 파형을 나타낸다. 표 5는 수치로 요약한 것이다. 부하는 시시각각으로 변하고 또한 고조파 측정 장비로 ZED설치 전후의 고조파를 측정하는데 시간(약 10분)이 소요 되므로 전압의 크기와 전압 왜형율이 차이가 난다고 사료된다.

표 5. 전압 비교
Table 5. Voltage comparisons

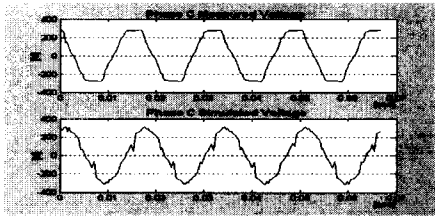
| | | ZED 설치전 | ZED 설치후 | ZED 설치후 |
|----|-----------|---------|---------|---------|
| | | 실측 | 실측 | 시뮬레이션 |
| A상 | VA[Vrms] | 213.5 | 212.8 | 209.1 |
| | VTHD,A[%] | 19.9 | 10.5 | 12.61 |
| B상 | VB[Vrms] | 218.4 | 214.1 | 218.2 |
| | VTHD,B[%] | 18.9 | 9.7 | 13.33 |
| C상 | VC[Vrms] | 214.6 | 213.0 | 213.6 |
| | VTHD,C[%] | 15.7 | 9.5 | 12.06 |



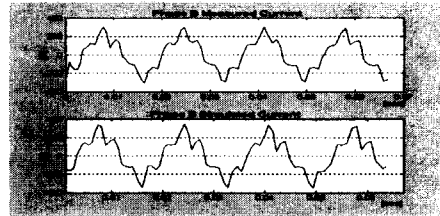
(a) A상의 전압파형



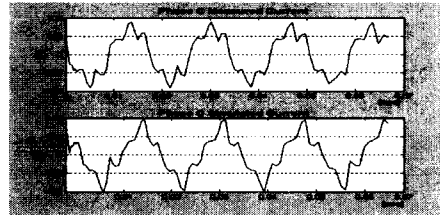
(b) B상의 전압파형



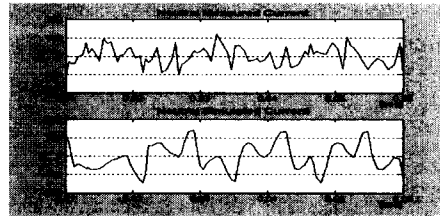
(c) C상의 전압파형



(b) B상의 전류파형



(c) C상의 전류파형



(d) N상의 전류파형

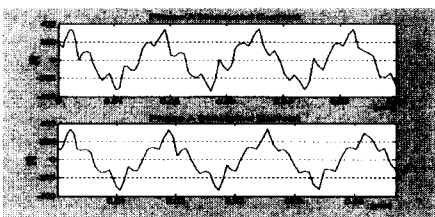
그림 8. ZED 설치후의 전압 파형
Fig. 8. Voltage waveforms after ZED application

그림 9. ZED 설치후의 전류 파형
Fig. 9. Current waveforms after ZED application

그림 9는 ZED 설치후의 전류 파형으로 실측한 파형과 MATLAB 시뮬레이션 한 파형을 나타낸다. 표 6은 수치로 요약했다. 실측한 값과 시뮬레이션 한 값과의 차이가 있는 것은 부하 변동과 분전반 주변에 연결된 중성선에 영상 고조파 전류가 유입된 것으로 판단된다. 영상 전류 저감장치는 이론적으로 영상 임피던스를 영으로 만들기 때문에 사계연구 시스템의 영상 전류뿐만 아니라 중성선에 연결된 다른 부하로부터는 영상전류가 유입될 수 있다.

표 6. 전류 비교
Table 6. Current comparisons

| | | ZED 설치전 실측 | ZED 설치후 실측 | ZED 설치후 시뮬레이션 |
|----|------------------------|---------------|---------------|------------------|
| A상 | IA[Arms] | 201.1 | 173.3 | 193.0 |
| | I _{THD,A} [%] | 47.2 | 36.6 | 38.6 |
| B상 | IB[Arms] | 197.7 | 184.2 | 179.8 |
| | I _{THD,B} [%] | 55.8 | 36.5 | 24.1 |
| C상 | IC[Arms] | 218.1 | 207.8 | 197.5 |
| | I _{THD,C} [%] | 56.7 | 36.5 | 28.1 |
| N상 | IN[Arms] | 254.3 | 74.1 | 53.7 |
| | I _{THD,N} [%] | 1848.4 | 121.2 | 137.7 |



(a) A상의 전류파형

영상전류 저감장치를 조명부하에 적용한 결과 설치전 중성선의 전류 254[A]가 설치후에는 74[A](시뮬레이션은 54[A])로 대폭 감소하였고, 전류 왜형율은 설치전 1848[%]에서 설치후에는 121[%](시뮬레이션은 138[%])로 감소되었다.

5. 결 론

우리나라 배전시스템은 3상 4선식을 채택하고 있으며 단상 부하와 3상 부하가 혼합되어 중성선에 불평형 전류가 흐르고 조명부하와 같은 비선형 부하로 인한 고조파 발생으로 중성선에 더 많은 고조파 전류가 흐른다. 사례연구 시스템의 중성선 전류는 254.3[A]로서 선전류의 불평형을 6.1[%]로 인한 불평형 전류와 비선형 부하의 고조파 함유율 1848.4[%]로 인한 고조파 전류로 구성되어 있다. 중성선에는 예측한대로 제 3고조파가 1848[%]이나 포함되어 있었다.

중성선의 고조파 전류를 저감시키는 장치로 중성선 영상 전류 저감장치가 널리 사용되고 있다. 지그재그 변압기를 이용하여 영상 임피던스를 작게하여 영상분(3배수 고조파) 전류를 상쇄시키는 원리이다. 상용화되어 현장에서 쓸 수 있는 영상 전류 저감장치를 조명부하에 적용하여 고조파 저감 효과를 실측과 시뮬레이션으로 알아보았다. 전압은 필터 설치전 평균 왜형율이 18[%]에서 필터 설치후에는 평균 왜형율이 10[%]로 개선되었다. 선로 전류는 필터 설치전 평균 왜형율이 53[%]에서 필터 설치후에는 평균 왜형율이 37[%]로 저감 되었다. 중성선 전류는 필터 설치전에는 254[A]에서 설치후에는 74[A]로 대폭 감소하였고 전류 왜형율은 설치전 1848[%]에서 설치후는 121[%]로 저감 되었다. MATLAB으로 시뮬레이션한 결과는 만족할 수 있었다. 다른 비선형 부하에 영상 전류 저감장치를 설치하지 않고도 그 효과를 예측할 수 있다고 사료된다.

향후 부하 변동이 없는 고조파 발생장치에 영상 전류 저감장치를 적용하여 실측과 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 검증할 계획이다. 또한 중성선 전류와 접지 임피던스와의 관계를 정립하여 접지 임피던스 효과를 알아보고자 한다.

본 연구는 전력산업 기술개발사업으로 수행되었음.

References

- [1] A. C. Liew, "Excessive Neutral Currents in Three-phase Fluorescent Lighting Circuits", IEEE Transactions on Industry Applications, July/August 1989.
- [2] J. C. Balda and et. al, "Measurements of Neutral Currents and Voltages on a Distribution Feeder", IEEE Transaction on Power Delivery, October 1997.
- [3] T. Key and J. Lai, "Analysis of Harmonic Mitigation Methods for Building Wiring Systems", IEEE Transactions on Power Systems, August 1998.
- [4] G. Ferguson, "Zero Phase Sequence Current Filter Apparatus and Method for Connection to the Load End of Six or Four-wire Branch Circuits", United States Patent p/n 6,043,569, March 2000.
- [5] L. H. Beverly st al, "Method and Apparatus for Reducing the Harmonic Currents in AC Distribution Networks", US Patent P/N 5,576,942, Nov. 1996.
- [6] "중성선 영상 고조파 저감장치 사양서", (주)피에스디테크, 2003.
- [7] "MATLAB User's manual", Math Works, 2002.
- [8] "3030A Profiler", Dranetz BM, 2000.

◇ 저자소개 ◇

김경철 (金慶植)

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

이일무 (李一茂)

1971년 7월 16일생. 2000년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001~현재 (주)피에스디테크 연구원. 2003~현재 동 대학원 박사과정.

정영호 (鄭英鎭)

1957년 5월 5일생. 1980년 동국대학교 전기공학과 졸업. 1983년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 연세대 대학원 전기컴퓨터공학과 졸업(박사). 1989년~현재 한전전력연구원 선임연구원.

백승현 (白承鉉)

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