

## 배전 시스템의 고조파 분석 및 모델링에 관한 연구

(A Study on Harmonics Analysis and Modelling for Distribution System)

왕용필\* · 정종원 · 정동일

(Yong-Peel Wang · Jong-Won Jeong · Dong-li Jeong)

### 요 약

최근 전력 전자 응용 기기의 사용증가로 비선형 특성 부하에 의한 고조파가 상당히 발생하고 있으며, 이에 의한 영향으로 배전시스템의 변압기 열화, 소자의 고장, 통신 간섭 등의 여러 가지 문제를 발생시키고 있다. 따라서 배전 시스템에서의 고조파 수준과 전달특성을 정확하게 분석하기 위하여 배전시스템의 효과적인 실측정과 모델링에 관한 연구가 필요한 실정이다.

본 논문에서는 고조파 관리기준 IEC61000-3-6 토대로 배전 시스템의 고조파 특성을 해석하기 위하여 공통 결합점(Point of Common Coupling : PCC)을 선택하였다. 실 배전 시스템의 PCC 지점에서 고조파 전압, 전류를 측정하여, 고조파 분포, 비선형 부하 성분 및 고조파 전압, 전류 왜형률 (Voltage/Current Total Harmonic Distortion: VTHD/I THD)을 분석하였다. 또한 정상상태에서 고조파 임피던스, 전압, 전류를 해석을 통하여 실 배전시스템을 효과적이고 정확하게 모델링 되었을 확인하였다. 또한 고조파 전류원 발생시에 고조파 전압, 전류를 비교 분석하여 고조파 전달특성을 조사하였다.

### Abstract

The increasing use of power electronic equipment in distribution system has been the reason for the greater concern about a harmonic in recent time. Therefore, it is necessary for measurement and modelling to analyze a harmonic level and a transfer characteristic in distribution system.

In this paper, the Point of Common Coupling (PCC) is selected to analyze harmonic characteristic of distribution system by IEC 61000-3-6. Harmonic voltage and current were measured at the PCC of real distribution system. Harmonic distribution, nonlinear load component and Total Harmonic Distortion(THD) were verified. The effective and accurate modelling of real distribution system were proved through a analysis of harmonic impedance, voltage and current under steady-state. Harmonic transfer characteristic were investigated through a analysis of harmonic voltage and current under harmonic current source.

Key Words : Point of Common Coupling, IEC 61000-3-6, Total Harmonic Distortion,  
Harmonic Transfer Characteristic

\* 주저자 : 동아대학교 전기공학과 초빙교수

Tel : 051-200-6944, Fax : 051-200-7743, E-mail : ypwang@donga.ac.kr

접수일자 : 2006년 12월 8일, 1차심사 : 2006년 12월 14일, 심사완료 : 2006년 12월 26일

## 1. 서 론

최근 각국의 전력 회사 및 전기를 사용하는 수용가들은 전력 품질에 대한 관심과 요구가 점점 증대되고 있다. 전력 품질 지수에는 Harmonic distortion, Voltage fluctuations flicker, Voltage sag under voltages, Voltage swell over voltages, Short duration interruptions, 및 Unbalanced 중에서 최근에 관심을 많이 가지는 부분이 고조파이다[1-2].

최근에는 전력전자 응용 기기의 사용 증가로 비선형 특성 부하에 의한 고조파가 상당히 발생하고 있으며, 주입된 고조파는 배전 시스템의 변압기 열화, 소자의 고장, 통신 간섭 등의 여러 가지 문제를 일으키고 있다. 현재 우리나라의 배전 시스템은 3상 4선식을 채택하고 있으며 이로 인해 3배수 고조파 전류가 불평형 전류와 함께 중성선에 다량으로 흐르게 되어 배전 시스템에서 OCGR 트립, NGR 과열, 중성선 과열 등의 문제를 야기하고 있다[3-4].

본 논문에서는 배전시스템의 고조파 특성을 분석하기 위하여 A 변전소 배전시스템의 고조파 전압, 전류를 측정하여, 고조파 종합 왜형률 (Voltage/Current Total Harmonic Distortion : THD)를 분석하였다. 또한 고조파 분석을 위한 배전시스템을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 정확히 모델링하였다. 배전시스템의 고조파 분석 및 모델링에 대한 유용성을 입증하고자 정상상태와 고조파 전류원 주입시 시뮬레이션 한 고조파 전압, 전류 및 고조파 임피던스를 비교, 분석하였다.

## 2. 고조파

### 2.1 고조파의 정의

일반적으로 고조파(High Frequency)는 전력관계에서 상용 주파수보다 높은 주파수로 정의하며, 고조파(Harmonics)는 기본파에 대하여 그의 정수배의 주파수로 정의 한다. 선형 네트워크에 정현파의 정전압이 인가되었을 때, 정현파의 전류가 생기게 되는데, 이 때 비선형적인 요소들이 유입되었을 때 고조파는 발생한다[4-5].

고조파 성분은 기본 주파수의 정수 배에 해당하는 주파수들이며, 주기적인 파형들이다. 푸리에 급수 전개식을 이용하면, 고조파의 전압과 전류는 식 (1), (2)와 같이 표현된다.

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega_0 t + \theta_n) \quad (1)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega_0 t + \psi_n) \quad (2)$$

여기서  $n$ 은 고조파 수 또는 고조파의 차수

### 2.2 고조파 발생원과 영향

각종 전력변환 시스템은 비선형 부하로 구성되어 있으므로, 여기에서 발생하는 고조파 전류는 전원 계통의 전압왜곡을 일으킨다. 따라서 발생원의 내부 임피던스와 전기설비의 임피던스가 공진 조건을 만족하면 고조파 전류는 증폭되어 전자유도장해를 일으킨다. 고조파 전류의 발생원은 대부분 전력전자소자를 사용하는 기기에서 발생한다. 그 종류를 들어 보면 변환장치(인버터, 컨버터, 무정전 전원장치, 정류기), 아크로, 전기로, 형광등, 회전기, 변압기 등이 있다. 이중에 변환장치, 아크로, 전기로는 지속적인 고조파 전류성분이 크기 때문에 다른 기기나 선로에 미치는 영향이 대단히 크다.

이상과 같은 고조파 부하는 그 자체의 성질상 전 원으로부터 왜형과 전류를 소모하므로 계통 전체에 대해서 고조파 전류원으로 동작하여 시스템내를 순환하는 고조파 전류를 흘리거나 시스템내의 전압 파형을 찌그러뜨려서 다른 기기에 영향을 준다. 고조파 전류가 유입하는 경우 위와 같은 직접적인 영향 이외에도 각종 전기설비 및 기기의 온도상승이 높아지고 절연물의 수명도 저하하게 된다.

### 2.3 고조파 기준

고조파 지수를 정량화 하는 대표적인 기준은 고조파 종합 왜형률이다. THD는 왜곡된 파형에 대한 고조파성분이 가장 효과적인 값을 나타내게 되는데, 식 (3), (4)와 같이 표현된다.

배전 시스템의 고조파 분석 및 모델링에 관한 연구

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100(\%), \quad n \geq 2 \quad (3)$$

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100(\%), \quad n \geq 2 \quad (4)$$

여기서,  $V_1, I_1$  : 기본파 전압, 전류의 실효치  
 $V_n, I_n$  : 제  $n$ 차 고조파 전압, 전류의 실효치

### 3. PSCAD/EMTDC를 이용한 모델링

배전시스템의 고조파 해석을 효과적으로 수행하기 위하여 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전시스템을 모델링을 하였다[6].

#### 3.1 발전기

전원모델의 선정은 시스템 구성과 연구목적에 따라 달라질 수 있으나 일반적으로 송·배전시스템에는 이상 정현파전원이 사용된다. 차과도(sub-transient) 리액턴스를 포함한 이상전원은 연계시스템을 가지는 큰 발전소를 표현하는데 사용되며, 계통관성은 무관하고, 외란에 의해 주파수는 변하지 않는다. 변전소는 공급전압이 154[kV], 단락용량이 9,070[MVA], 단락 임피던스는 100[MVA] 기준으로 0.00046+j0.01102[p.u.]이다.

#### 3.2 변압기

본 논문에서 사용한 변압기 사양은 표 1과 같다.

표 1. 변압기 명세표  
 Table 1. List of transformer

정격전압	1차 : 154[kV]	2차 : 22.9[kV]	3차 : 안정권선
용량	1차 : 6000[KVA]	2차 : 60000[KVA]	3차 : 45000[KVA]
탭 전압	1차 : 154kV±12.5%(21 tap) 2차 : -		
결선	1차 : Wye	2차 : Wye	3차 : Delta
임피던스	#1	M-X : 14.51[%]	M-Y : 8.0[%] X-Y : 2.0[%]
	#2	M-X : 14.41[%]	M-Y : 8.0[%] X-Y : 2.0[%]
	#3	M-X : 19.12[%]	M-Y : 10.44[%] X-Y : 2.68[%]

### 3.3 전송선로

전력을 수송하는 전송선로는 전기적 특성을 갖는 일반전기회로로 나타낼 수 있으며, 또한 전기적 특성인 저항(R), 인덕턴스(L) 정전용량(C), 누설콘덕턴스(G)로 표현할 수 있다. 배전선로에서 선종별로 단위 [km]당 정상, 영상 임피던스는 표 (2)와 같다. 단 선로에서 정상 임피던스와 역상 임피던스 값은 동일한 것으로 보고 계산한다. PSCAD/EMTDC를 이용한 설계 방법으로 T-LINE과 PI SECTION을 사용하였다.

표 2. 22.9(kV) 배전선로 임피던스  
 Table 2. Impedance of 22.9(kV) distribution line

선 종		임피던스([Ω])					
		정상임피던스			영상임피던스		
전압선	중성선	R	C	L	R	C	L
ACSR-95	ACSR-58	0.3068	0.4449	0.0012	0.7417	1.7118	0.0045
ACSR-95	ACSR-95	0.3068	0.4449	0.0012	0.7142	1.632	0.0043
ACSR-160	ACSR-95	0.1836	0.3946	0.001	0.6343	1.5479	0.0041

#### 3.4 부 하

부하는 일반적으로 유효전력(P)과 무효전력(Q)으로 표현된다. 따라서 식 (5)를 이용하여 전기적 파라메타인 R과 X로 모델링할 수 있다.

$$R = \frac{V^2}{P}, \quad X = \frac{V^2}{Q} \quad (5)$$

### 4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 고조파 전류 주입시 임피던스의 주파수영역 응답 특성을 파악하고, 정상 상태에서 전압, 전류파형을 분석하기 위하여 그림 1과 같이 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전시스템을 모델링하였다. 그리고 고조파 전류원 발생시에 전압, 전류파형을 검토하여 배전시스템에서의 각 상별로 고조

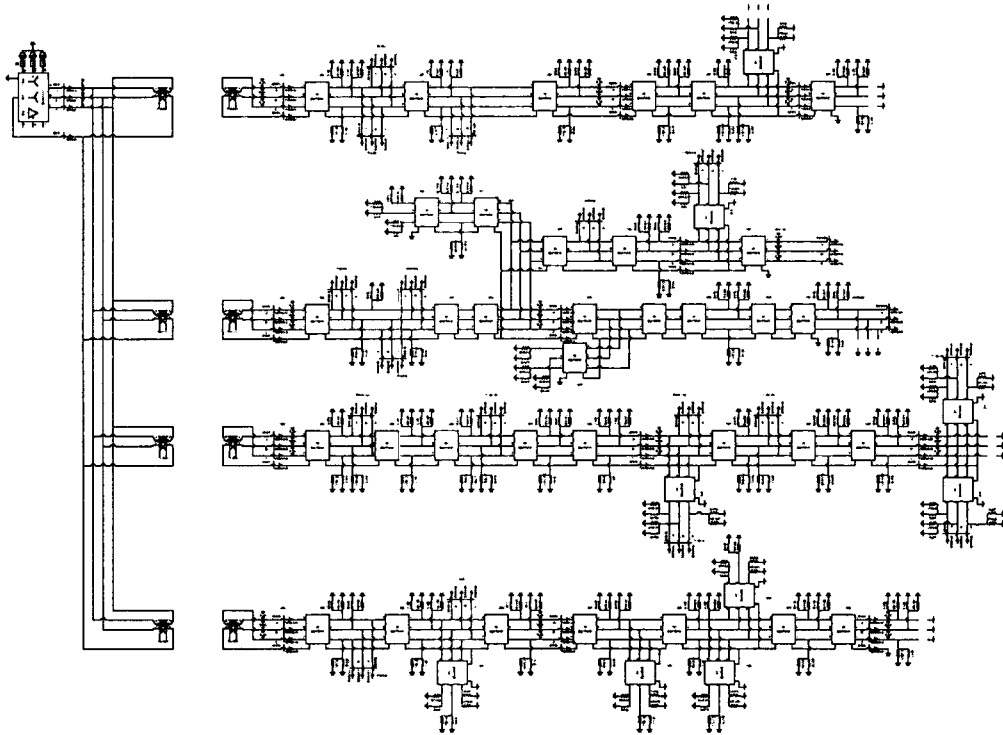


그림 1. 22.9(kV) 배전시스템  
Fig. 1. 22.9(kV) distribution system

파 함유량과 왜형률을 확인하고 시스템에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

#### 4.1 고조파 임피던스 분석

시간 영역 시뮬레이션에서 외부 시스템의 전압파

형을 구하고, 이 파형을 이산 푸리에 변환을 이용하여 주파수 영역 응답을 구할 수 있다. 그림 2는 배전 시스템의 부하가 대부분 직렬로 연결되어 있어 임피던스가 증가함을 알 수 있다. 그리고 정상분과 역상분이 거의 유사함을 보인다.

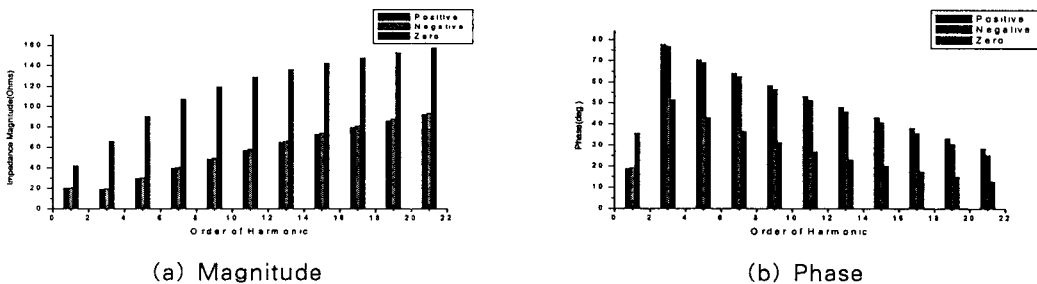


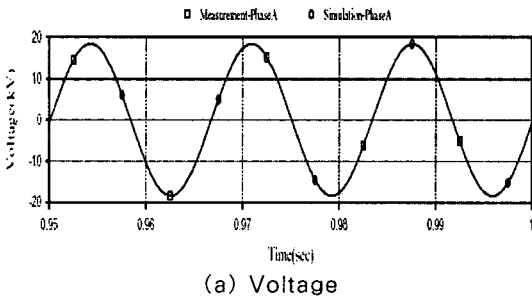
그림 2. 임피던스 주파수 응답  
Fig. 2. Frequency response of impedance

### 4.2 정상상태에서의 배전시스템

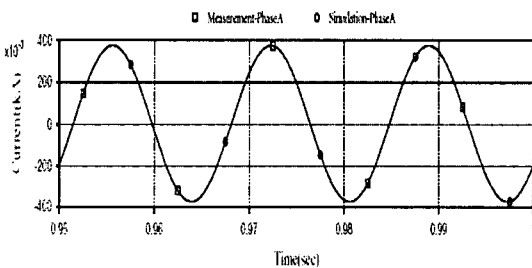
그림 3은 정상 상태에서의 A상 전압파형과 N상 전류파형을 측정값과 나타내었다. 측정 위치를 변압기 2차측 지점 (1), 시스템의 중간 지점 (2), 및 말단 지점 (3)에 측정하였다. 전압과 전류파형을 보면 왜곡이 거의 일어나지 않음을 알 수 있다. 전압은 변압기 2차측 지점과 말단 지점을 비교하면 전압강하는 0.19~0.54[%]로 표 4와 같이 나타났다. 이상의 결과에서 배전시스템 모델링결과가 정확함을 보여 준다.

표 4. 전압 강하율  
Table 4. Rate of voltage drop

	천마D/L	태극 D/L	서대 D/L	대신 D/L
A 상(%)	0.19	0.33	0.14	0.53
B 상(%)	0.2	0.35	0.15	0.52
C 상(%)	0.2	0.34	0.15	0.54



(a) Voltage



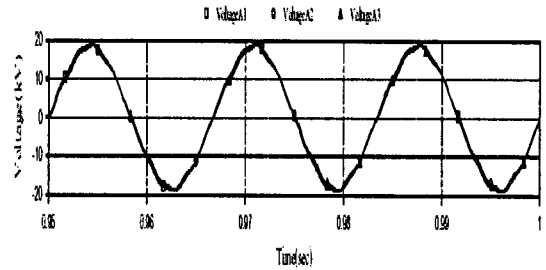
(b) Current

그림 3. 전압, 전류 비교  
Fig. 3. Comparison of voltage and current

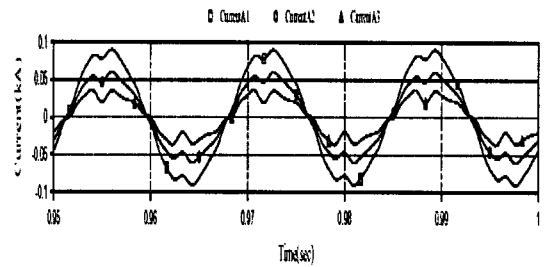
### 4.3 고조파 전류원 주입시의 배전시스템

그림 4는 고조파 전류원이 시스템의 말단에 각 상

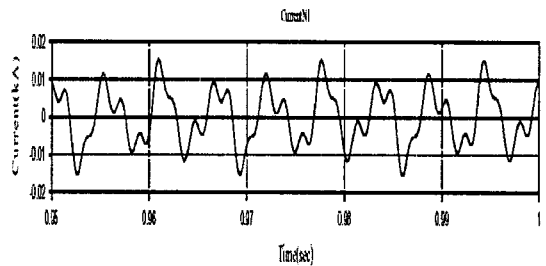
별로 3고조파(3.7[%]), 5고조파(2.7[%]), 7고조파(1.7[%]), 9고조파(1.1[%]), 11고조파(0.5[%])가 주입되었을 경우 A상 전류파형과 N상 전류파형 그리고 A상 전압파형을 나타내었다.



(a) Harmonic voltage



(b) Harmonic current



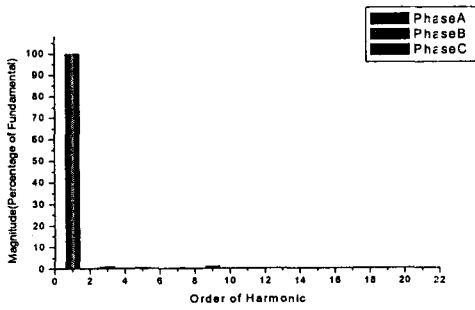
(c) Neutral current

그림 4. 천마 D/L 고조파 전압, 전류 및 중성선 전류  
Fig. 4. Harmonic voltage, current and Neutral current

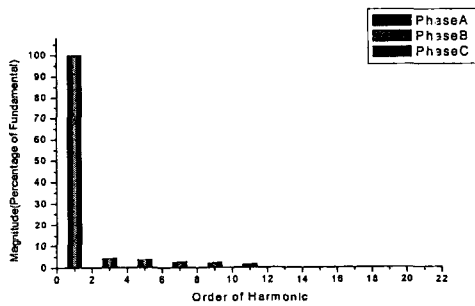
측정 위치를 변압기 2차측 지점(1), 시스템의 중간 지점(2), 및 말단(3)에 측정하였다. 이상의 결과에서 전압과 전류파형은 고조파원의 주입으로 왜곡이 나타남을 알 수 있다. 전압은 변압기 2차측과 말단 지점을 비교하면 전압강하는 0.17[%]로 나타났다.

그림 5는 고조파 전압과 전류의 차수별 성분을 나

타내었다. 중성선으로는 3고조파 성분이 많이 흐르는 것을 알 수 있다. 여기서 각 상별  $V_{THD}$ ,  $I_{THD}$ 는 표 5와 같다.



(a) Harmonic voltage



(b) Harmonic current



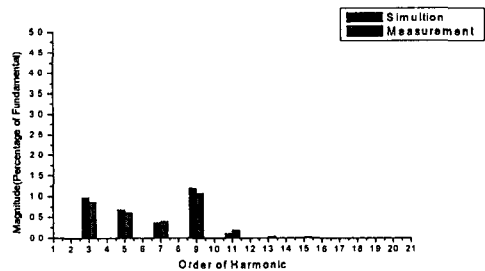
(c) Neutral current

그림 5. 고조파 전압, 전류 및 중성선 전류  
Fig. 5. Harmonic voltage, current and Neutral current

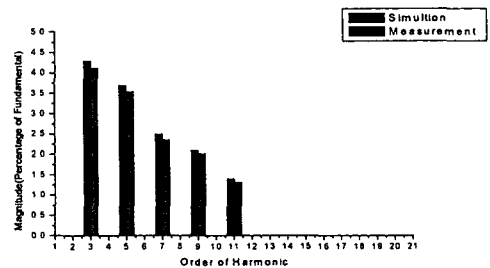
표 5. 종합 왜형률  
Table 5. Total harmonic distortion

D/L	Phase	$V_{THD}$	$I_{THD}$
천마	A	2.14	6.24
	B	2.04	5.33
	C	2.19	6.9
태극	A	4.42	9.14
	B	4.35	9.25
	C	4.29	9.04
서대	A	2.99	7.34
	B	3.18	8.72
	C	2.95	8.48
대신	A	3.95	4.19
	B	4.23	4.33
	C	3.67	4.28

그림 6은 실 배전 계통에서 측정된 경우와 시뮬레이션 경우의 고조파 전압 및 전류를 비교, 검토 하였다. 이상에서 PSCAD/EMTDC를 이용한 모델링 결과가 타당함을 보여주고 있다.



(a) Voltage



(b) Current

그림 6. 고조파 전압, 전류  
Fig. 6. Harmonic voltage, current

## 5. 결 론

본 논문에서는 시스템에 발생하는 고조파 분석을 효과적으로 수행하기 위해서 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하였다. 또한 시스템의 고조파 임피던스를 측정하여 고조파 분포를 확인하였다. 정상 상태와 고조파 전류원 주입시에 전압, 전류파형을 측정, 분석하였다.

1. 모델링한 시스템에서의 임피던스의 크기가 실제와 같이 측정되었다.
2. 정상 상태에서의 전압, 전류파형 분석 결과 모델링한 배전시스템이 실제 시스템과 동일하게 모델링 되었음을 확인하였다.
3. 고조파 전류원 주입시에 각 상별 고조파 성분을 분석하여 각 차수별 고조파량을 파악하였고, 중성선에 많은 양의 3고조파가 발생함을 확인하였다.

## References

- [1] Stones. J and Cillinson. A, "Power quality", Power Engineering Journal, Vol. 15, 2, pp.58 - 64, April 2001.
- [2] Mack Grady. W and Santoso, S, "Understanding power system harmonics", Power Engineering Review, IEEE, Vol. 21, pp.8-11, Nov. 2001.
- [3] IEC 1000-3-6, "Electromagnetic Compatibility, PART3 : Section6 : Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems.", 1996.
- [4] Zhou Yong, "Harmonic sources in the city distribution system", Advances in Power System Control, Operation and Management, 1997. APSCOM-97. Fourth International Conference, Volume: 2 , pp:549 - 551, Nov. 1997.
- [5] McGranaghan, M, "Overview of the guide for applying harmonic limits on power systems-IEEE P519A", Harmonics And Quality of Power, 1998. Proceedings. 8th International Conference, Vol. 1, pp.462 - 469, Oct. 1998.
- [6] "PSCAD/EMTDC Power System Simulation Software Manual", Monitoba HMDC Research Centre, 1996.

## ◇ 저자소개 ◇

### 왕용필 (王龍泌)

1966년 8월 25일생. 1992년 동아대학교 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1999~2001년 뉴질랜드 캔터베리대학 전기공학과 Post-Doc. 현재 동아대학교 전기공학과 초빙교수.

Tel : (051)200-6944

Fax : (051)200-7743

E-mail : ypwang@daunet.donga.ac.kr

### 정중원 (鄭鍾元)

1972년 5월 6일생. 1998년 동아대학교 공대 전기공학과 졸업. 2001년 부산대학교 메카트로닉스와 졸업(석사). 현재 동아대학교 전기공학과 박사과정.

Tel : (051)200-6951

Fax : (051)200-7743

E-mail : jwjeong@donga.ac.kr

### 정동일 (鄭東一)

1960년 8월 6일생. 1984년 동아대학교 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 부산동의공업고등학교 전기과 교사.

E-mail : cdil@dreamwiz.com