

# 고성능 필터를 이용한 접지저항 측정시스템의 설계

(Design of the Ground Resistance Measuring System using high Performance Filter System)

이기홍\* · 정재기\*\* · 주형준\*\*\*

(Ki-Hong Lee · Jae-Ki Jung · Hyung-Jun Joo)

## 요 약

본 논문에서는 지중의 노이즈들로부터 영향을 받지않는 접지저항 측정시스템을 설계하였다. 일반적으로 기존의 접지저항 측정기는 지중에 노이즈가 잠재되어 있을 경우, 접지저항 측정신호가 영향을 받아 정확한 접지저항을 측정하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 L-C공진필터와 마이크로프로세서를 이용하여 지중의 잡음환경에서도 정확히 접지저항을 측정할 수 있는 접지저항 측정기를 설계하였다. 또한 현장시험을 통해 설계된 접지저항측정기가 지중의 노이즈로부터 영향을 받지않음을 입증하였다.

## Abstract

This paper represents the design of the ground resistance measuring system insensitive to the noise in the earth. Generally, conventional ground resistance measuring instruments may fail to give a precise values for ground resistance under the situations where there is a high ground potential produced by unbalanced power system currents, harmonic currents and noise etc.

To make up the defect of conventional ground resistance measuring instruments, in this paper the ground resistance measuring system using high-performance L-C resonant filter and digital signal processor, is designed and the insentivity of the designed ground resistance measuring system for noise in the earth is verified by field test on power service and off power service.

key words : ground resistance, harmonic current, filter, digital signal processor

## 1. 서 론

전력시설물에서의 접지시스템은 전력시설물 고장

시에 발생하는 대지전위나 접촉전압 및 보폭전압 등과 같이 위험한 전압을 안전한 전압 수준으로 제한하는 기능을 하고 있다. 즉, 접지시스템은 인체의 안전과 장비의 보호 및 확실한 동작을 보장하는 중요한 시스템이라 할 수 있다[1]. 따라서 접지시스템의 접지저항 측정을 비롯한 성능 점검 및 주기적인 유지보수는 매우 중요하다.

그러나 운전중인 전력시설물에서는 고조파를 비롯한 각종 노이즈가 지중에 잠재해 있어 기존의 접지

\* 정회원 : 대한주택공사 선임연구원. 공박

E-mail : khlee@hri.knhc.co.kr

\*\* 정회원 : (주)한빛EDS 대표. 공박

\*\*\* 정회원 : 충남대학교 전기공학과 박사과정

접수일자 : 2001년 8월 22일

1차심사일 : 2001년 8월 27일

심사완료일 : 2001년 9월 13일

고성능 필터를 이용한 접지저항 측정시스템의 설계

저항 측정기로 측정할때 노이즈의 영향을 받아 정확한 접지저항을 측정하기가 어렵다[2].

이러한 배경하에 본 논문에서는 지중의 잡음환경에서도 정확히 접지저항을 측정할 수 있는 고정밀 접지저항 측정시스템을 설계하고자 한다.

2. 접지저항과 지중의 잡음환경

2.1 접지저항 측정 방법

일반적으로 접지저항을 측정하는 방법에는 전위강하법, 직독계법, 대지저항을 측정기에 의한 방법 등 다양한 방법이 있다. 하지만 현재 가장 정확도가 높으며, 광범위하게 사용되는 측정방법은 전위강하법이며, 이 방법은 특히 대규모 접지시스템의 접지저항 측정에 적합한 것으로 알려지고 있다[3].

전위강하법에 의한 접지저항 측정방법은 원리적으로 가상적인 무한 원점의 대지전위를 기준으로 하여 접지극의 대지전위를 측정한다.

전위강하법에 의한 접지저항 측정방법은 그림 1과 같이 보조전극(C2) 또는 접지전극에 전류 I[A]를 인가한다. 이때 그림 1과 같이 접지전극의 전위가 무한 원점의 대지전위에 비해 V[V]만큼 높아지면 이 전위 상승값 V[V]와 유입된 전류I[A]의 비, 즉 V/I를 그 접지극의 접지저항이라고 한다.

그러나 운전중인 전력설비에서는 3상의 불평형전

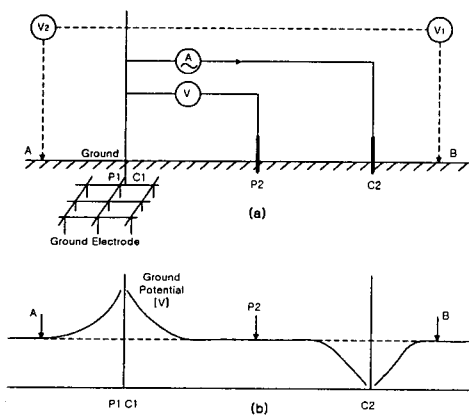


그림 1. 전위강하법 측정계의 구성 (a) 과 대지전위 분포도 (b)  
Fig. 1. The configuration of the fall-of-potential method (a) and The ground surface potential distribution (b)

류와 고조파, 정전용량 등에 의해 항상 접지극으로 전류가 흐르고 있어 대지전위를 형성한다. 따라서 이러한 전류는 그림 2와 같이 접지저항을 측정하기 위한 전류와 함께 대지전위를 형성하므로 접지저항 측정시 큰 오차를 초래하게 된다[4].

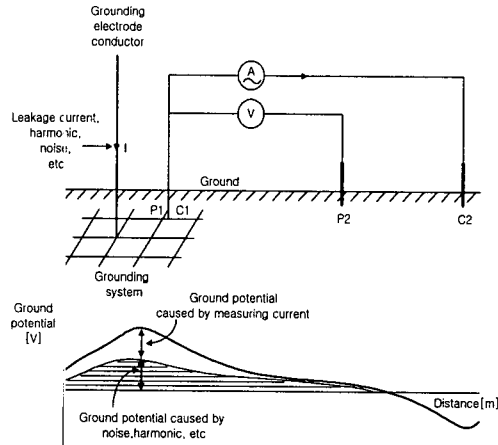


그림 2. 잡음과 신호전류에 의한 대지전위 개념도  
Fig. 2. The ground potential caused by noise and signal current

2.2 지중의 잡음환경 특성

각종 전력설비의 접지저항 측정에 오차를 유발하는 잡음성분의 분석과 특성파악을 위하여 5개의 전력설비에 대한 접지극의 노이즈 성분을 30Hz의 측정 신호전류를 인가한 상태에서 측정하였다.

그 결과 그림 3과 같이 접지저항 측정신호성분인 30 Hz에 비해 직류분, 기본파, 3,5,7고조파 성분들의 크기가 우세하게 나타나고 있었으며 전력설비들마다

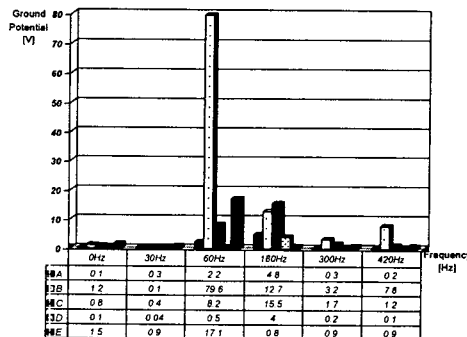


그림 3. 각 전력설비에서의 주파수별 대지전위  
Fig. 3. The ground potential value classified by frequencies at various substations

상황에 따라 잡음환경의 특성이 크게 다른 것으로 나타났다. 특히 신호전류로 30Hz의 전류를 사용하였을 때 기본파성분(60Hz)은 약 800배 정도까지 크게 발생하는 것으로 분석되었다.

### 3. 접지저항 측정시스템의 설계

#### 3.1 기본 설계 개념과 시스템 구성

접지저항 측정시스템은 일반적으로 대지에 인가한 측정전류와 이때 발생하는 대지전위에 의해 접지저항을 측정하게 된다. 따라서 설계하고자 하는 접지저항 측정시스템에서는 측정신호를 최대한 정확히 검출하기 위하여 고정밀 아날로그필터와 마이크로프로세서에 의한 주파수 분석 기법을 적용하였다.

또한 접지저항측정시스템은 야외 현장에서 주로 사용되는 계기이므로 시스템을 소형화, 경량화하였고 조작 방법도 용이토록 설계하였다. 시스템의 기능도 최대한 소프트웨어화하여 열악한 사용환경 조건에서도 강인한 시스템이 되도록 하므로써 시스템의 신뢰성을 향상시켰다.

접지저항 측정전류로서는 30[Hz]의 소전류를 사용하였다. 이러한 측정전류는 시스템이 소형화될 수 있다는 장점이 있지만, 지중에 있는 기본파 성분과 인접한 대역의 주파수 성분이므로, 급격한 감쇠특성을 갖는 고정밀 필터가 요구된다는 특징이 있다.

이와같이 설계하고자 하는 접지저항 측정시스템은 그림 4와 같이 DSP에 의한 중앙처리장치와 전류보조극(C1, C2)에 전류를 공급하는 전류공급장치, 공급된 전류의 크기를 검출하는 전류검출부, 대지전위를 검출하고 노이즈를 제거하는 전압검출부, 그리고 이들 주변장치들을 중앙처리장치와 연결해주는 인터페이스부로 구분된다. 이들 구성기기 중에서 전압검출

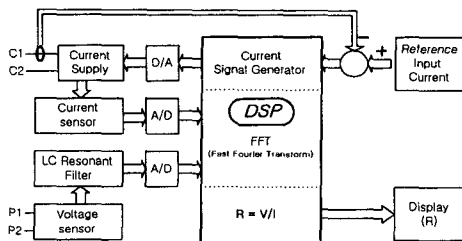


그림 4. 접지저항 측정시스템의 전체 내부구성도  
Fig. 4. The Block diagram of ground resistance measuring system

부는 시뮬레이션형 LC공진필터회로를 갖는데, 이는 대지속에 형성되어 있는 각종 대지전압 중에서 측정 신호성분만을 검출하는 고정밀 필터이다.

### 3.2 고정밀 필터시스템의 설계

#### 3.2.1 필터회로의 선정

지중의 잡음환경특성을 분석한 결과 측정신호(30[Hz])에 의한 대지전위와 기본파(60[Hz])의 대지전위 크기가 최대 800배 정도까지 발생하는 경우도 있는 것으로 분석되고 있어, 여유율을 고려한다면 두 주파수대역(30[Hz]와 60[Hz])사이에서 약 1000배(60dB)이상의 감쇠능력을 갖는 필터회로가 필요하다.

그러나 신호 대 잡음비가 60dB 정도가 되면 잡음신호 성분이 너무 우세하여 디지털 필터만을 가지고는 신호성분을 검출할 수 없는 상황이 발생되며 잡음신호의 크기가 디지털필터회로에서 받아들일 수 있는 한계를 벗어나는 경우도 있다. 따라서 본 논문에서는 아날로그 필터에 의해 잡음세력을 충분히 제거한 후 출력된 신호를 마이크로프로세서에 의해 디지털로 노이즈를 재차 처리하도록 설계하였다.

본 논문에서 설계하고자 하는 아날로그 필터시스템은 30[Hz]와 60[Hz]사이에서 60[dB]이상의 감쇠능력을 갖는 필터시스템을 설계하고자 한다. 이와같이 좁은 대역에서 급격한 감쇠특성을 갖는 필터시스템을 설계할 경우 급격한 감쇠특성을 만족하기 위해 고차 능동필터를 사용하면 고감도 특성에 의해 시스템이 불안정하게 되며, 반면에 저감도 특성을 갖는 LC 사다리꼴형 필터를 사용하면 감쇠특성을 충족시키지 못하는 어려움이 있다. 따라서 급격한 감쇠특성과 저감도 특성을 갖는 필터시스템이 필요하며 이러한 시스템은 LC 시뮬레이션형 능동필터가 적합하다.

#### 3.2.2 LC시뮬레이션형 능동 필터

고차능동필터는 감쇠특성이 우수하지만 고감도 특성을 나타내므로 수동 LC필터를 모의하여 능동 RC필터를 얻는 LC 시뮬레이션형 능동필터를 구현할 수 있다. 이 방법은 설계도 편리하고 수동 LC필터의 낮은 감도 특성이 그대로 능동필터에서도 유지된다는 장점이 있다. 즉 수동 LC필터의 외형적 모양만을 그대로 유지하고 그중 불편한 인덕터 소자를 모의법을 통하여 직접 대체해 준다.

이때 인덕터를 모의해 주는 회로를 일반임피던스

고성능 필터를 이용한 접지저항 측정시스템의 설계

변환기(Generalized Impedance Converter : GIC)라 하며 그 회로는 그림 5와 같이 2개의 연산증폭기와 5개의 임피던스로 구성된다. 이때 GIC의 구동점 임피던스  $Z_D$ 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_D = \frac{V}{I} = \frac{Z_1 Z_3 Z_5}{Z_2 Z_4} \quad (1)$$

따라서  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5$ 를 각각 어떻게 선정하는가에 따라 그림 5의 GIC가 다양한 임피던스로 변화될 수 있다[5].

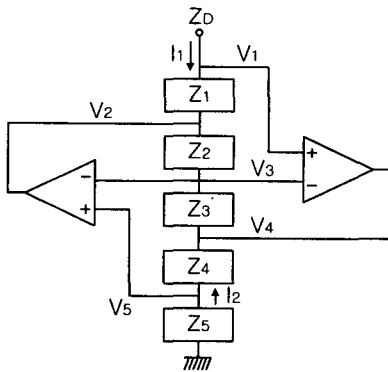


그림 5. GIC 회로  
Fig. 5. GIC circuit

3.2.3 시뮬레이션형 LC공진 필터회로의 설계

본 논문에서 설계하고자 하는 아날로그 필터는 그림 6과 같이 공진주파수 30[Hz]를 갖는 LC 공진 대역통과 필터회로이다.

그림 6과 같은 대역통과 LC 공진필터회로에서 인덕터 L를 GIC회로로 대체하면 그림 7과 같은 필터회로를 얻을 수 있다.

이러한 필터회로 7개를 그림 8과 같이 버퍼를 이

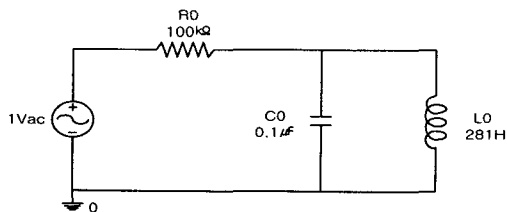
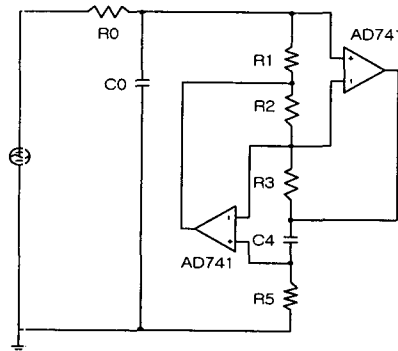


그림 6. 대역통과 LC 공진필터 ( $f_r=30[Hz]$ )  
Fig. 6. The band pass LC resonant circuit

용, 직렬로 연결하여 그림 9와 같이 60[Hz]의 신호성분을 약 62dB 까지 감쇠시키는 필터시스템을 구성하였다. 이때 신호성분은 그림 10과 같이 2.08[V]의 입력신호가 최종필터(7단)에서 2.01%로 출력되어 약 3.3%가 감소되는 것으로 나타나 약간의 보정이 필요함을 나타내고 있다.



R0	C0	R1	R2	R3	C4	R5
100	0.1	53.04	1	53.04	0.1	1
[kΩ]	[μF]	[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]	[μF]	[kΩ]

그림 7. 인덕터가 모의된 대역통과 능동필터  
Fig. 7. The active circuit constituted by the simulated inductor

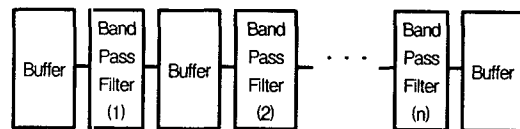


그림 8. 버퍼를 사용하여 접속한 필터시스템  
Fig. 8. The cascaded filter system with the buffer

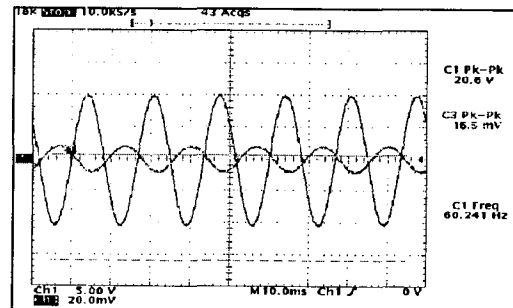


그림 9. 제작된 필터회로(7단)의 60(Hz) 성분에 대한 감쇠특성  
Fig. 9. The attenuation characteristic of proposed filter circuit(7step) at 60(Hz)

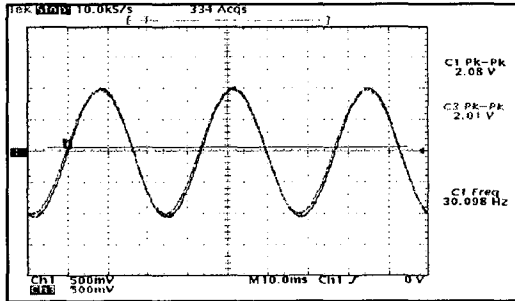


그림 10. 제작된 필터회로(7단)의 30 [Hz] 성분  
에 대한 감쇠특성  
Fig. 10. The attenuation characteristic of  
proposed filter circuit (7step) at 30 [Hz]

### 3.3 제어 및 부속장치의 설계

#### 3.3.1 DFT의 설계

본 논문에서 설계하는 접지저항 측정시스템에서는 고정밀의 LC 공진필터에 의해 1차로 대지의 잡음성분을 최대한 억제시키고 난 후에 2차로 마이크로프로세서에 의해 DFT(Discrete Fourier Transform)를 실행시키는 2단계의 필터링 과정을 수행하도록 하였다. 즉 N개의 디지털 신호계열  $x_n(n=0, 1, 2, \dots, N-1)$ 에 대하여 그 주파수 스펙트럼  $X_M(k)$ 은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$X_M(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W^{-nk}; W = e^{\frac{j2\pi}{N}} \quad (2)$$

단,  $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$

즉, 식 (2)는 푸리에 변환의 디지털 표현으로서 이산적 푸리에 변환(DFT : Discrete Fourier Transform)이라 부르는데 본 논문에서는 마이크로 프로세서(DSP)를 사용하여 이를 실현하였다.

사용된 마이크로프로세서는 TMS320C32모델의 DSP를 사용하였으며 이때 대지전위를 이산처리하기 위한 샘플링 개수는 210(=1024)으로 하였다.

#### 3.3.2 부속장치의 설계

##### (1) 신호전류 공급장치

신호전류 공급장치는 그림 11과 같이 측정하고자 하는 대상 접지극에 전류를 인가할 수 있는 전원장

치로 전력사에서 공급되는 전력을 사용할 수도 있고, 충전지를 사용할 수 있도록 설계되어 있다.

이때 전력사에서 공급하는 전원을 사용하는 경우 완전절연설계를 통해 측정하고자 하는 접지극과의 전기적 관계를 완전히 절연시키도록 하였다.

또한 마이크로프로세서의 신호발생회로로부터 주파수 및 크기신호를 받아 증폭회로에서 선형적으로 신호를 증폭하여 전류극 C1, C2의 인가전류로 사용될 수 있도록 전력연산증폭기를 사용하였다. 또한 주위여건에 따라 전원확보가 어려운 경우에는 별도의 발전기에 의해 전류공급장치 기능을 대신할 수 있다.

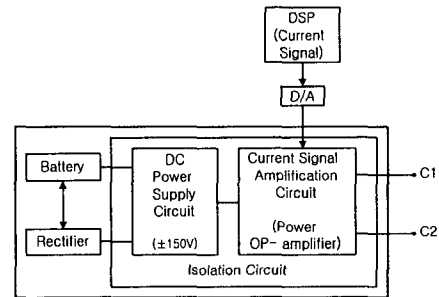


그림 11. 신호전류 공급장치  
Fig. 11. The isolated power supply system

##### (2) A/D 변환부

A/D 변환부는 전류측정장치의 전류정보와 전압 측정장치를 통한 대지전위의 전압정보를 디지털화하는 기능을 갖는 변환기 회로이다. 이 회로의 기능은 전류정보와 전압정보를 동시에 디지털화(A/D 변환)함에 있어 대지전위인 전압정보와 전류정보를 동시에 처리하여 전기적으로 전압정보와 전류정보와의 위상차 문제를 해결토록 하였다.

또 하나의 기능은 신호발생회로에서 발생한 크기와 주파수를 갖는 신호를 전원장치에 전달하는 D/A 변환기능을 수행한다. 또한 제어장치에서 보내준 주파수 신호의 한 주기를 최소 32번 이상 샘플링 하도록 설계하였고 한번 샘플링 할 때 16비트(bit) A/D처리를 함으로서 1/65536의 분해능을 갖도록 설계, 제작하였다.

전압정보와 전류정보를 이용하여 접지저항을 계산할 때에는 전압정보와 전류정보를 동시에 샘플링 하여 전압정보와 전류정보를 시간차 없이 디지털화하는 기법을 사용하였다.

#### 4. 현장실험 및 결과

설계된 접지저항 측정기의 성능을 확인하기 위하여 기존 접지저항측정기와 함께 접지망의 크기가 87[m] × 72[m]인 00변전소에서 변전소가 정지 중일 때와 운전 중일 때 접지저항을 측정하였다. 측정방법은 전위강하법을 이용하였으며 측정전류의 크기는 200[mA]의 전류를 이용하였다.

그 결과 기존의 접지저항 측정기는 변전소가 운전 중일 경우 잡음성분에 의해 불규칙적인 측정값을 나타내고 있는 반면, 설계된 접지저항 측정기는 정지중일때(그림 12)와 운전중일 때(그림 13) 모두 약 1.2 [Ω]의 접지저항 값을 나타내어 설계된 접지저항측정기는 잡음의 영향을 받지 않음이 입증되었다.

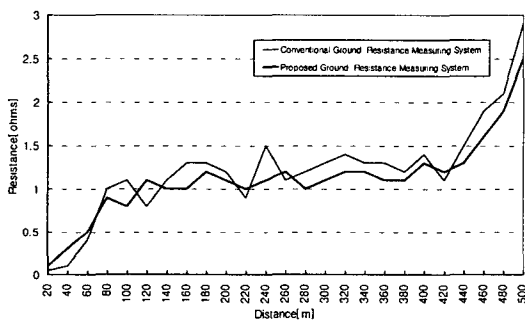


그림 12. 정지중인 전력설비의 접지극에서 측정된 접지저항 곡선  
Fig. 12. The resistance curves at deenergized power station

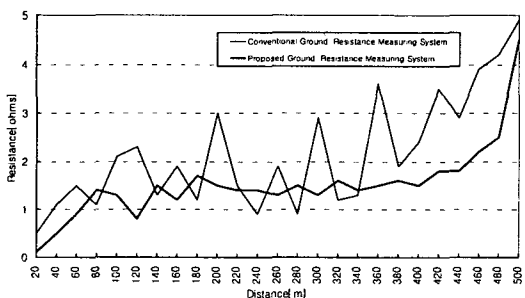


그림 13. 운전중인 전력설비의 접지극에서 측정된 접지저항 곡선  
Fig. 13. The resistance curves at energized power station

#### 5. 결 론

본 논문에서는 전력설비가 시설된 지중의 잡음환경 특성을 분석하고 이들 잡음성분들의 영향을 받지 않는 접지저항 측정시스템을 설계하였다. 측정전류신호는 30[Hz]의 전류를 사용하였으며 이때 측정신호를 잡음신호로부터 정확히 검출하기 위한 고정밀 필터와 DFT를 설계하였다. 이와같이 설계된 접지저항측정기를 현장에 적용한 결과, 잡음신호에 매우 강한 인함성을 입증하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] PR Pillai, EP Dick, "A Review on Testing and Evaluating Substation Grounding Systems", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.7, Jo.1, pp.53-58, Jan 1992.
- [2] I.D. Lu And RM Shier, "Application of a Digital Signal Analyzer to the Measurement of Power System Ground Impedances", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No.4, pp.1918-1921, April 1980.
- [3] ANSI/IEEE Std 81-1983, "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System", IEEE inc, pp.7-42, 1983.
- [4] LiMaotang and Li Jing, "A New Type of Grounding Resistance Measurement Method", IEEE Trans. Instrument and Measurement, Vol.48, No.5, pp.899-903, Oct.1999.
- [5] Harry Y-F. Lam, "Analog and Digital Filters: Design and Realization". pp.19-pp38. 1979.

#### ◇ 저자소개 ◇

##### 이 기 홍 (李起弘)

1962년 11월 17일생. 1988년 충남대 전기공학과 졸업. 1990년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 대한주력공사 주택연구소 선임연구원.

##### 정 재 기 (鄭才基)

1961년 5월 3일생. 1985년 충남대 전기공학과 졸업. 1987년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1989년~1998년 한국전력연구원 선임연구원. 현재 한빛 EDS 대표.

##### 주 형 준 (朱螢俊)

1972년 2월 20일생. 1996년 충남대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1998년 동 대학원 졸업(석사). 1999년 동 대학원 박사과정. 2000년~2001년 한빛 EDS(주) 과장.