

Pattern Search 법을 이용한 중성선 고조파 해석용 접지 임피던스 모델링

(The Ground Impedance Modeling using Pattern Search Method for
Neutral Harmonic Analysis)

김경철 · 백승현* · 최중기 · 이일무 · 백남용

(Kyung-Chul Kim · Seung-Hyun Paik · Jong-Ki Choi · Il-Moo Lee · Nam-woong Baek)

요 약

3상 4선식 배전계통을 채용하는 우리나라는 비선형 부하의 증가로 중성선에는 많은 중성선 고조파 전류가 관측되고 있다. 또한 접지 임피던스는 고조파가 있는 중성선 전류에 영향 끼친다고 알려져 있다. 전위 강하법에 따라 현장에서 실측한 고조파 전류와 전압을 측정하고, Pattern Search 기법으로 고조파 해석용 접지 임피던스를 모델링하였다. 여기서 구한 임피던스 모델은 현장 시험에 의한 임피던스 모델과 비교하여 유사한 결과를 얻었고, 접지 시스템의 고조파 및 과도 응답 특성을 평가하는데 활용될 것으로 사료 된다.

Abstract

With the proliferation of nonlinear loads, high neutral harmonic currents in three-phase four-wire distribution system have been observed. It has been known that the ground impedance has an effect on the neutral currents of a system which operates with harmonics present. On-site measurements of harmonic currents and voltages according to the fall-of-potential method under case study system were made and the ground impedance modeling using the pattern search method for the harmonic analysis was developed. The ground impedance model obtained by the proposed method was compared with the frequency characteristics by field tests and has shown appropriate results, and would be applicable to evaluate the harmonic and transient response characteristics of the ground system.

Key Words : Neutral harmonic currents, Ground impedance, Equivalent circuit, Fall-of-potential method, Pattern search method

1. 서 론

우리나라는 3상 4선식 배전 시스템을 채용하고 있

어, 비선형 부하로 인하여 중성선에 많은 고조파 전류가 흐른다. 과도한 중성선 고조파 전류는 중성선 과열, 통신선 잡음, 전기전자 장비의 오동작 등 많은 고조파 장애를 일으키므로 중성선 고조파 해석이 필요하다[1]. 중성선은 접지 시스템과 연결되어 있다. 중성선과 대지간의 전압은 공중의 안전과 절연의 적합성 등에 중요한 요인이 된다. 대지 전압은 중성선 고조파 전류와 접지 임피던스에 의해 결정되므로 접

* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 대학원
Tel : 016-9363-0086, Fax : 041-863-7605

E-mail : kingpaik2@hotmail.com
접수일자 : 2004년 5월 24일
1차심사 : 2004년 6월 1일
심사완료 : 2004년 6월 14일

Pattern Search 법을 이용한 중성선 고조파 해석용 접지 임피던스 모델링

지 임피던스 모델링이 필수적이다[2].

본 논문에서는 전위 강화법[2]으로 고조파 전류와 고조파 전압을 측정하고 Pattern Search 기법[3]으로 사례연구 접지 시스템의 접지 임피던스를 모델링하고자 한다.

2. 고조파 해석용 등가회로 모델

고조파 해석용 등가회로를 구성하려면 비선형 부하와 접지 임피던스 모델이 우선되어야 한다.

2.1 비선형 부하 모델

비선형 부하의 모델은 고조파 전압과 전류 및 전력의 측정이 요구 된다. 측정점 에서 본 전압원은 기본과 전압과 고조파 전압의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{AN} &= V_{A1} + V_{Ah} \\ V_{BN} &= V_{B1} + V_{Bh} \\ V_{CN} &= V_{C1} + V_{Ch} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 V_{A1} 은 A상의 기본과 전압이고, V_{Ah} 는 A상의 고조파 전압으로 h 는 2, 3, ... 이다.

IEEE Std 519[4]에 따르면 비선형 부하는 기본과 전류에 의한 임피던스 부하와 고조파 전류원의 합으로 나타낼 수가 있다.

$$\begin{aligned} I_A &= I_{A1} + I_{Ah} \\ I_B &= I_{B1} + I_{Bh} \\ I_C &= I_{C1} + I_{Ch} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 I_{A1} 은 A상의 기본과 전류로 부하 A의 임피던스 Z_A 로 등가변환 한다. I_{Ah} 는 A상의 고조파 전류로 h 는 2, 3, ... 이다.

$$Z_A = R_A + jX_A = \frac{[V_{AN}]^2 (P_A + jQ_A)}{P_A^2 + Q_A^2} [\Omega] \quad (3)$$

여기서 P_A 는 A상의 유효전력[W], Q_A 는 A상의 무효전력[VAR]이다. 마찬가지로 I_{B1} 은 B상의 기본과

전류로 부하 B의 임피던스 Z_B 를 등가 변환하고, I_{C1} 은 C상의 기본과 전류를 나타내고 부하 C의 임피던스 Z_C 로 등가 변환할 수 있다.

중성선 고조파 전류는 선전류의 합으로 나타낸다.

$$I_N = I_A + I_B + I_C \quad (4)$$

2.2 접지 임피던스 모델

접지 임피던스는 토양의 특성, 대지 저항률, 온도, 습도, 접지체 모양과 접속 상태 등 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하므로 접지 임피던스를 모델링하기는 쉽지 않다[2].

본 논문에서 사용하고자 하는 고조파 해석용 접지 임피던스 모델은 참고 문헌[5]에서 제시한 저항 R, 인덕턴스 L, 커패시턴스 C의 조합으로 그림 1과 같다.

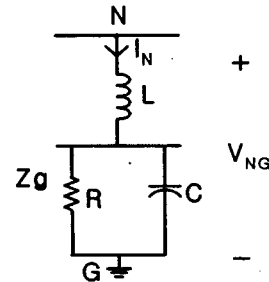


그림 1. 접지 임피던스 모델
Fig. 1. Ground impedance model

그림 1에서 N은 부하의 중성점, I_N 은 중성선의 고조파 전류이고, V_{NG} 는 중성선과 대지 접지 기준점G 사이의 전압이다. 접지 임피던스는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Z_g &= j\omega L + \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} \\ &= \frac{R}{1 + (wCR)^2} + j[\omega L - \frac{wCR^2}{1 + (wCR)^2}] [\Omega] \end{aligned} \quad (5)$$

2.3 시스템 모델

측정점 에서 본 비선형 부하의 3상 등가회로는 그림 2와 같이 유도된다.

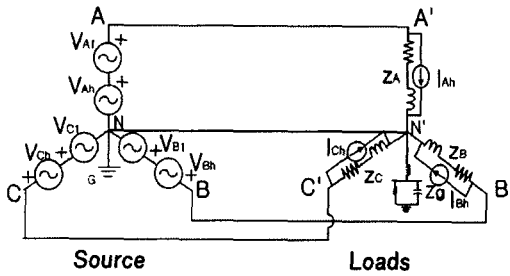


그림 2. 고조파 해석용 3상 등가회로
Fig. 2. Three-phase equivalent circuit for harmonics analysis

3. 사례 연구

사례연구에서는 접지 시스템을 구성하고, 계측기로 대지 고유 저항률과 접지 저항을 측정한다. 접지 임피던스 측정 시스템을 구성하고, 전위강하법[2]으로 전압과 전류를 오실로스코프와 BMI장비로 측정한다. Pattern Search 법[3]으로 접지 임피던스를 모델링 하고자 한다.

3.1 접지 시스템 구성

사례연구에 적용한 접지 시스템은 동양 산전(주)에서 상용화 시킨 접지봉(매직봉[6])을 회사 부지 내에 매설하여 구성하였다. 그림 3은 사용된 매직봉의 외관이다. 크기는 $\phi 100 \times L1500$ [mm]이고, 고강도 도전성 모르터 및 무기물질 등을 혼합하여 내구성 0.03%, 압축강도 410[kg/cm²]의 우수한 도전성 접지 효과를 장기간 유지하게 되는 특징을 가지고 있다.

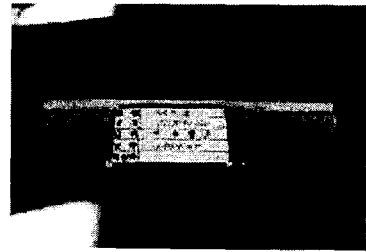


그림 3. 매직봉의 외관
Fig. 3. Outside view of Magic Bong

접지 시스템의 구성은 그림 4와 같다. 7개의 매직봉을 5개는 7.5[m] 간격으로 7.5[m]를 파고 매직봉 한 개당 팽창 저감재를 250[kg]을 도포하여 일렬로 설치했다. 2개중 1개는 간격을 12.5[m], 깊이는 21[m]로 저감재 350[kg]을 도포하고, 나머지 1개는 간격 10[m], 깊이는 58.5[m]로 설치했다. 매설 지선에 사용된 전선은 CV케이블 38[mm]를 사용하여 접지망을 구성하였다.

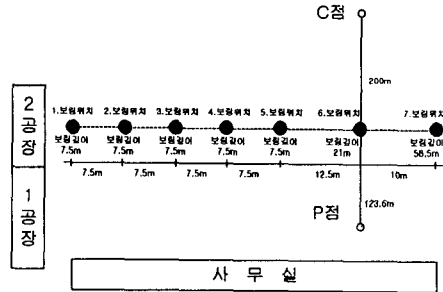
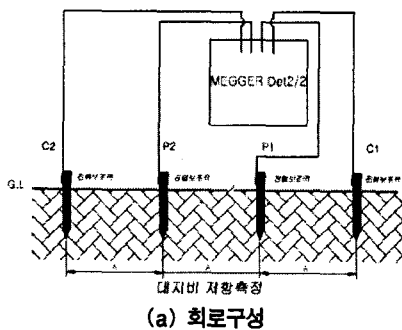
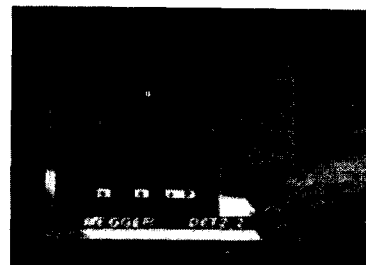


그림 4. 접지 시스템 구성
Fig. 4. Ground system configuration



(a) 회로구성



(b) 측정 장비 외관

그림 5. 대지 고유 저항률 측정 회로와 장비 외관도
Fig. 5. Measuring circuit of ground resistivity and outside view of the measuring equipment

3.2 대지 고유 저항률 측정 및 접지 저항 측정

그림 5는 Wenner 4 전극법으로 대지 고유 저항률을 측정하는 설명이다. 전위전극(P1, P2), 전류전극(C1, C2)을 배치하고, 각 전극간의 거리(a)가 등간격이 되도록 한다. 전극 간격을 1-20[m]까지 변화시키면서 측정한 결과는 표 1에 간추려 놓았다. 측정 장비는 AVO사의 모델 MEGGER DET2/2 [7]이다.

표 1. 대지 고유 저항률 측정값
Table 1. Measured soil resistivity

| 간격 a [m] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 측정저항 [Ω] | 28.8 | 15.08 | 10.32 | 7.03 | 5.9 | 5.13 | 4.02 | 3.7 | 3.33 | 2.99 | 2.69 | 2.32 | 2.01 |
| 고유 저항률 [Ω.m] | 180.9 | 189.4 | 194.4 | 176.6 | 185.3 | 193.3 | 202.0 | 232.4 | 250.9 | 262.9 | 270.3 | 262.3 | 252.5 |

접지 저항 측정은 MEGGER DET2/2 장비로 전위 강하법[2] (Fall-of-potential method) 원리로 측정하였다. 61.8[%] 법칙[7]에 따라 접지 전극과 전류 보조극 사이는 200[m], 접지 전극과 전압 보조극의 간격은 123.6[m]로 측정된 접지 저항 Rg 값은

$$R_g = 2.54 [\Omega] \text{이다.}$$

3.3 접지 임피던스 측정 시스템 구성 및 측정

그림 6은 접지 임피던스 측정시스템의 구성을 보인 것이다.

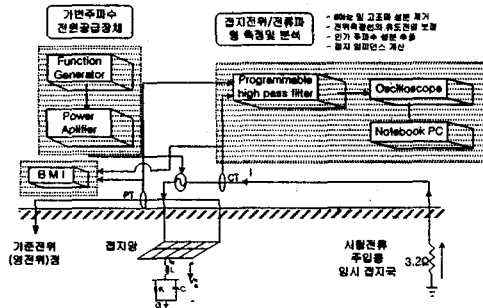


그림 6. 접지 임피던스 측정 시스템
Fig. 6. Measuring system for the ground impedance

측정 시스템의 구성요소는 신호발생기(0-900kHz 정현파), 신호증폭기, 고역필터, 오실로스코프, PC (Personal Computer), BMI[8]장비로 되어 있다.

접지 임피던스 측정 시스템은 임의로 선택한 주파수의 전류를 접지극으로 주입시키면서 접지 전위와 전류 파형을 측정하여 접지 임피던스를 계산한다. BMI 장비는 고조파 전류와 고조파 접지전압을 측정하는데 사용된다.

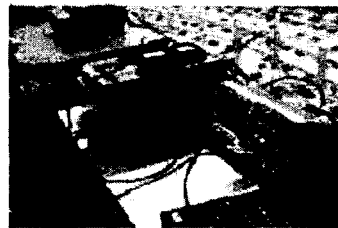


그림 7. 측정 시스템 외관도
Fig. 7. Outside view of the measuring system

표 2. 오실로스코프로 측정된 접지 임피던스
Table 2. Ground impedance measured by the oscilloscope

| Frequency | 고조파 | Vrms | Irms | Z[Ω] | 위상[deg] |
|-----------|-----|------|-------|-------|---------|
| 60 | 1 | 1.3 | 0.540 | 2.631 | -1.5 |
| 120 | 2 | 0.9 | 0.385 | 2.477 | -1.6 |
| 180 | 3 | 0.95 | 0.390 | 2.455 | 10.5 |
| 240 | 4 | 0.98 | 0.390 | 2.515 | -2 |
| 300 | 5 | 0.97 | 0.392 | 2.485 | -2.5 |
| 360 | 6 | 0.98 | 0.393 | 2.494 | -2.1 |
| 420 | 7 | 0.98 | 0.394 | 2.486 | -2.3 |
| 540 | 9 | 0.96 | 0.375 | 2.565 | -0.2 |
| 600 | 10 | 0.98 | 0.398 | 2.468 | -2.5 |
| 660 | 11 | 0.93 | 0.371 | 2.501 | -3.1 |
| 720 | 12 | 0.98 | 0.4 | 2.445 | -2.6 |
| 780 | 13 | 0.91 | 0.374 | 2.432 | -2.6 |
| 840 | 14 | 0.92 | 0.378 | 2.435 | -2.7 |
| 900 | 15 | 0.97 | 0.402 | 2.411 | -2.6 |
| 10000 | | 0.75 | 0.364 | 2.053 | 4.7 |
| 20000 | | 0.56 | 0.273 | 2.062 | 19.7 |
| 30000 | | 0.47 | 0.198 | 2.393 | 33.2 |
| 50000 | | 0.36 | 0.103 | 3.542 | 45 |
| 70000 | | 0.44 | 0.1 | 4.377 | 14.8 |
| 80000 | | 0.28 | 0.098 | 2.883 | 7.8 |
| 100000 | | 0.20 | 0.091 | 2.279 | 61 |

그림 7은 사용된 접지 임피던스 측정 시스템의 외 관도이다. 좌측부터 BMI, 합승발생기(상), 신호증폭기(하), 오실로스코프, 노트북으로 배치되어 있다.

오실로스코프로 측정된 실측치는 표 2에 간추려 놓았다.

그림 8은 오실로스코프로 측정된 접지 임피던스의 주파수 특성 그래프이다.

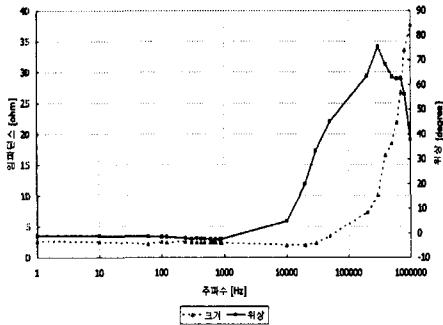


그림 8. 접지 임피던스의 주파수 특성
Fig. 8. Frequency characteristics of the ground impedance

BMI 장비로 측정된 실측치는 표 3에 간추려 놓았다.

표 3. BMI 장비로 측정된 접지 임피던스
Table 3. Ground impedance measured by BMI

| Frequency | 고조파 | Vrms | Irms | Z[Ω] | 위상[deg] |
|-----------|-----|------|-------|-------|---------|
| 60 | 1 | 1 | 0.379 | 2.639 | -1.5 |
| 180 | 3 | 0.9 | 0.378 | 2.381 | -1.8 |
| 240 | 4 | 1.1 | 0.385 | 2.857 | -2 |
| 300 | 5 | 1 | 0.384 | 2.604 | -2.5 |
| 360 | 6 | 1.1 | 0.383 | 2.872 | -2.1 |
| 420 | 7 | 1.1 | 0.387 | 2.842 | -2.3 |
| 540 | 9 | 1.1 | 0.384 | 2.865 | -2.3 |
| 600 | 10 | 1.1 | 0.386 | 2.85 | -2.5 |
| 660 | 11 | 1.1 | 0.386 | 2.85 | -3.1 |
| 720 | 12 | 1 | 0.384 | 2.604 | -2.6 |
| 780 | 13 | 1 | 0.381 | 2.625 | -2.6 |
| 840 | 14 | 1 | 0.381 | 2.625 | -2.7 |
| 900 | 15 | 1 | 0.386 | 2.591 | -2.6 |
| 1020 | 17 | 1.4 | 0.541 | 2.588 | -1.2 |
| 2040 | 34 | 1.2 | 0.479 | 2.505 | 0.3 |
| 3000 | 50 | 1 | 0.398 | 2.513 | 2.3 |
| Total | | 17.1 | 6.402 | 2.671 | |

그림 9는 BMI로 측정된 전압파형이고, 그림 10은 측정된 전류파형을 나타낸다.

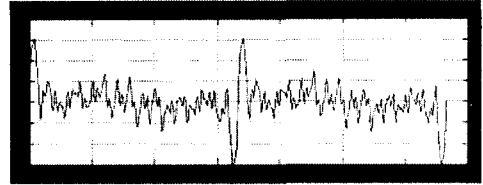


그림 9. BMI로 측정된 전압 파형
Fig. 9. Voltage waveforms measured by BMI

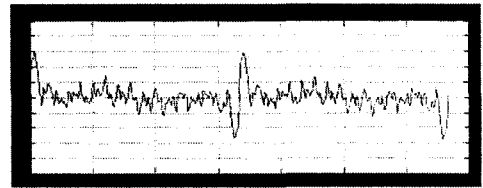


그림 10. BMI로 측정된 전류 파형
Fig. 10. Current waveforms measured by BMI

3.4 접지 임피던스 모델링

접지 임피던스 모델은 그림 1과 같이 간단한 직렬 인덕턴스와 저항과 커패시턴스가 병렬로 연결된 조합으로 나타낸다.

그림 1에서 접지 임피던스를 전달함수로 표현하면,

$$Zg(s) = \frac{s^2 LCR + sL + R}{sCR + 1} \quad (6)$$

이 된다. BMI로 측정된 전류(I_{mea})와 전압(V_{mea})으로부터 접지 저항 R 값을 구한다.

$$R = \frac{V_{mea}}{I_{mea}} = \frac{17.1}{6.402} = 2.671 [\Omega]$$

인덕턴스 L과 커패시턴스 C는 BMI로 측정된 전류와 전압으로부터 구할 수 있다. 구하는 방법은 일종의 시행착오법인 Pattern Search법[3]을 이용한다.

그림 11과 같이 Pattern Search법은 L과 C를 변화시키면서 실측된 V_{mea}값(실효치)과 파형(THD, total harmonic distortion)을 시뮬레이션 한 Vsim

Pattern Search 법을 이용한 중성선 고조파 해석용 접지 임피던스 모델링

($V_{mea} * Z_g$) 값과 파형을 비교하여 오차가 일정 범위 내에 들 때 까지 반복하여 구하면 된다.

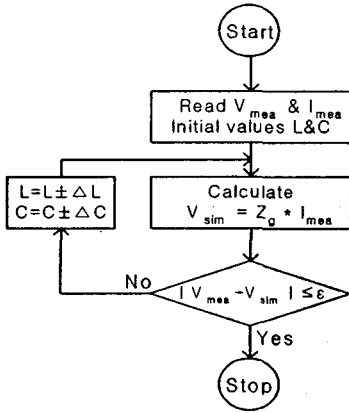


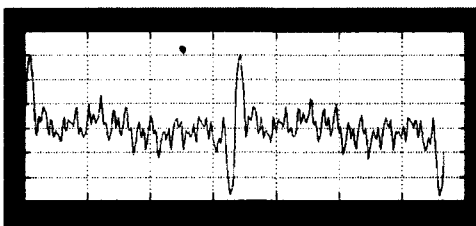
그림 11. PSM 순서도
Fig. 11. Flow chart of Pattern Search Method

Pattern Search법으로 구한 값은 다음과 같다.

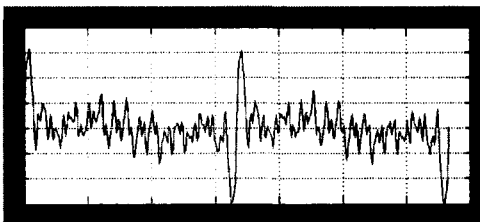
$$L = 0.203[mH]$$

$$C = 0.027[\mu F]$$

그림 12는 접지 임피던스 모델에 R, L, C값을 넣고, 측정한 전압(V_{mea})과 시뮬레이션 한 전압(V_{sim})파형을 비교한 그래프이다.



(a) 측정



(b) 시뮬레이션

그림 12. 전압 파형
Fig. 12. Voltage waveforms

수치로 비교하면 다음과 같다.

$$V_{mea} = 4.1 [V_{rms}], \quad V_{mea}, THD = 375[\%]$$

$$V_{sim} = 3.94[V_{rms}], \quad V_{sim}, THD = 377[\%]$$

그림 13은 접지 임피던스 모델에 R, L, C값을 넣고, MATLAB[9]를 사용한 Bode diagram이다. 실측한 그림 8과 비교해 보면 주파수 특성이 유사함을 알 수 있다.

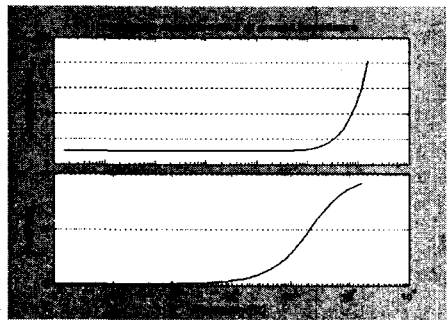


그림 13. 접지 임피던스의 Bode diagram
Fig. 13. Bode diagram of the ground impedance

4. 결 론

우리나라 배전 시스템은 3상 4선식을 채택하고 있어 중성선에 비선형 부하로 인한 고조파 발생으로 중성선에 많은 고조파 전류가 흐른다. 중성선은 접지 임피던스와 연결되어 있기 때문에 접지 임피던스는 중성선 고조파 전류에 영향을 끼친다고 알려져 있다.

본 논문에서는 중성선 고조파 해석을 위한 비선형 등가 모델과 접지 임피던스 모델을 실측을 통하여 구하였다.

사례연구 접지 시스템은 전위 강하법으로 고조파 전압과 고조파 전류를 측정하여 Pattern Search법으로 접지 임피던스를 모델링 하였다. 접지 임피던스는 저항 $2.671[\Omega]$, 인덕턴스 $0.203[mH]$, 커패시턴스 $0.027[\mu F]$ 을 얻었다.

IEEE Std 81에 의한 전위 강하법으로 계산한 접지 임피던스와 MATLAB 시뮬레이션으로 구한 접지 임피던스의 주파수 특성을 비교하여 거의 유사한

결과를 얻을 수 있었다.

본 논문에서 제시한 접지 임피던스 모델링 기법으로 접지 시스템의 고조파 전류 및 뇌격전류와 같이 높은 주파수를 포함하는 접지 전류 유입시 접지 시스템의 고조파 응답특성 및 과도 응답특성을 평가하는 데 활용될 것으로 사료 된다.

본 연구는 전력산업 기술개발사업으로 수행되었음.

References

- [1] J.C Balda and et al, "Measurements of Neutral Current and Voltages on a Distribution Feeder", IEEE Transaction on Power Delivery, October 1977.
- [2] IEEE Std 81-1983, "IEEE guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potential of a Ground System", IEEE Inc, 1993.
- [3] J.A. Cadeow and H.R. Martens, "Discrete-time and Computer Control System", Prentice-Hall Inc.,1970.
- [4] IEEE Std 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System".
- [5] I.F.Gonos, F.V.Topalis, I.A.Stathopoulos, "Transient impedance of grounding rods",International Symposium on High Voltage Engineering, 1999, vol.2 pp.272-275.
- [6] "매직 접지봉 사양서", 동양 산전(주), 2002.
- [7] Ma, J. Dawalibi, F.P. Ruan, W "Ground impedance measurement and interpretation in various soil structures", Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE , Volume: 3 , 23-27 Jan. 2000.
- [8] "3030A Profile", Dranetz BMI, 2000.
- [9] "MATLAB User's Manual", Math Work, 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 한국 전기연구소 선임 연구원. 1991~현재 홍익대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수.

백승현 (白承鉉)

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

최종기 (崔鍾基)

1969년 2월 1일생. 1992년 동국대학교 전기공학과 졸업. 1995년 홍익대학교 전기기계어공학과 석사. 1995~현재 한국 전력공사 전력연구원 전력 계통연구실 선임 연구원.

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 박사 과정.

백남웅 (白南雄)

1955년 1월 9일생. 1978~1989 진영전기 기술이사. 1989~1996년 미광전업 전무이사. 1997년~현재 동양 산전(주) 대표이사, 한국 접지기술 연구소장.