Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 18, No.4, pp. 60~67 July 2004 논문 18-4-9

현장시험에 의한 고조파 해석용 등가회로 모델링에 관한 연구

(A Study on the Equivalent Circuit Modeling for Harmonics Analysis by Field Tests)

김경철* · 최종기 · 백승현 · 김종욱
(Kyung-Chul Kim · Jong-Ki Choi · Seung-Hyun Paik · Jong-Uk Kim)

요 약

비선형 부하의 증가로 3상 4선식 배전계통을 채용하는 중성선에는 많은 중성선 고조파 전류가 관측되고 있다. 또한 접지 임피던스는 고주파가 있는 중성선 전류에 영향 끼친다고 알려져 있다. 현장에서 실측한 고조파 전압과 전류, 그리고 대지 고유 저항률과 접지 저항을 토대로 고조파 해석용 등가 회로를 구성하였다. MATLAB과 CDEGS 프로그램으로 시뮬레이션 하여 수치와 파형으로 적절한 결과를 도출하였다.

Abstract

With the proliferation of nonlinear loads, high neutral harmonic currents in three-phase four-wire distribution system have been observed. It has been also 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, and the soil resistivity and ground resistance under case study system were made and the corresponding equivalent circuit for the harmonics analysis was developed. This equivalent circuit model was simulated numerically and graphically through the use of MATLAB and CDEGS software packages, and adequate results were obtained.

Key Words : Nonlinear loads, Neutral harmonic currents, Ground impedance, Equivalent circuit

1. 서 론

우리나라는 3상 4선식 배전 시스템을 채용하고 있어, 비선형 부하로 인하여 중성선에 많은 고조파 전류가 흐른다. 과다한 중성선 고조파 전류는 중성선 과열, 통신선 잡음, 전기전자 장비의 오동작 등 많은 고조파 장해를 일으키므로 중선선 고조파 해석이 필요하다.

* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605
E-mail : yangjier@hongik.ac.kr
접수일자 : 2004년 2월 2일
1차심사 : 2004년 2월 6일
심사완료 : 2004년 3월 3일

본 논문에서는 고조파 해석용 등가회로를 모델링하고자 한다. 비선형 부하는 고조파 전압과 전류를 측정하여 등가 회로 모델을 구성한다. 중성선은 접지시스템과 연결되어있다. 중성선 고조파 전류는 접지극을 통해 대지에 유출되므로 접지 임피던스 모델도 등가회로에 포함되어야 한다.

사례연구 시스템을 구성하여 실측을 통해 데이터를 취득하고, 등가 회로를 구성한 후 실측한 값과 시뮬레이션 한 값을 통해 개발된 등가회로를 검증하고자 한다. 접지 시스템은 공중의 안전과 절연의 적합성 등에 중요한 요인이 되므로, 접지극에 중성선 고조파 전류로 인한 접지 전압과, 사고로 인한 임펄스 전류 유입시 접지극의 전압상승, 접촉전압, 보폭전압

을 계산하여 사례연구 시스템의 응답특성을 알아본다.

2. 고조파 해석용 등가회로 모델

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

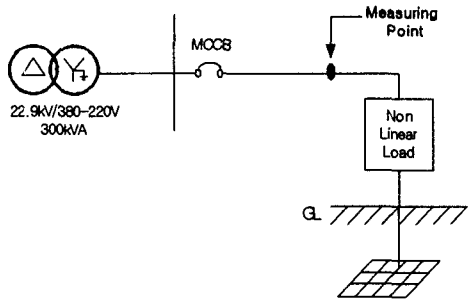


그림 1. 사례연구 배전 시스템
Fig. 1. Single-line diagram of the distribution system under study

그림 1은 사례연구 배전 시스템의 모선도이다. 충북 진천 소재의 동양 산전(주)에서 시험을 수행하였다. 주 변압기는 22.9[kV]의 공급전압을 2차측에 380-220[V] 전압으로 낮추어 부하에 전력을 공급하고 있다.

2.1 비선형 부하 모델

비선형 부하의 모델은 고조파 전압과 전류 및 전력의 측정이 요구 된다. 측정점 에서 본 전압원은 기본파 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 기본파 전압이고, V_{Ah}는 A상의 고조파 전압으로 h는 2,3,… 이다.

IEEE Std 519[1]에 따르면 비선형 부하는 기본파 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 기본파 전류로 부하 A의 임피던스 Z_A로 등가변환 한다. I_{Ah}는 A상의 고조파 전류로 h는 2,3,… 이다.

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

여기서 PA는 A상의 유효전력[W], Q_A는 A상의 무효전력[VAR]이다.

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[3] 에서 제시한 저항 R, 인덕턴스 L, 커패시턴스 C 의 조합으로 그림 2와 같다.

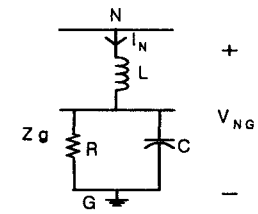


그림 2. 접지 임피던스 모델
Fig. 2. Ground impedance model

그림 2에서 N은 부하의 중성점, I_N은 중성선의 고조파 전류이고, V_{NG}는 중성선과 대지 접지 기준점[G]사이의 전압이다. 접지 임피던스는 다음과 같다.

$$Zg = jwL + \frac{\frac{R}{jwC}}{R + \frac{1}{jwC}}$$

$$= \frac{R}{1 + (wCR)^2} + j\left[wL - \frac{wCR^2}{1 + (wCR)^2} \right] [\Omega] \quad (4)$$

2.3 시스템 모델

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

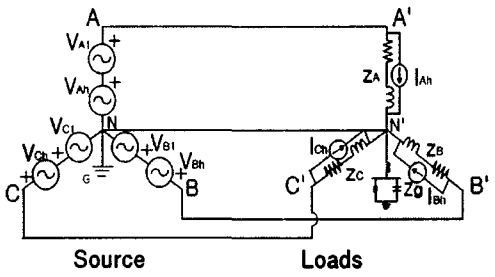


그림 3. 고조파 해석용 3상 등가회로
Fig. 3. Three-phase equivalent circuit for harmonics analysis

3. 사례 연구

사례연구 시스템의 고조파 해석용 등가회로를 모델링 하고자 한다. 실측을 통하여 비선형 부하를 모델링하고, 실측과 상용화된 접지해석 프로그램을 활용하여 접지 임피던스를 모델링 한다. 측정된 고조파 전압과 전류를 시뮬레이션 값과 비교 검토하고, 접지 시스템에 고조파 전류 유입시 접지극의 전압과, 사고로 인한 임펄스 전류 유입시 접지극의 전압상승, 접촉전압, 보폭전압을 계산하여 사례연구 시스템의 응답 특성을 알아본다.

3.1 비선형 부하 모델링

현장 시험에 사용한 비선형 부하는 (주)피에스디테크에서 시험용으로 제작한 고조파 발생 장치[4]이다. 주요 구성은 교류를 직류로 변환하는 정류부, 평활용 필터부, 스위칭 회로와 변화 가능한 부하로 되어 있다. 고조파 발생 장치의 사양은 3상, 220[V], 60[Hz], 0-40[A]이고, 전류 왜형율(THD, Total Harmonic Distortion)은 70[%] 정도이다. 그림 4는 사용한 고조파 발생장치의 외관이다.

고조파 측정 장비는 BMI 모델 3030A[5]를 사용하였다. 노트북과 연결시켜 50 고조파까지의 전압 및 전류를 측정할 수 있다.

측정시 전력은 다음과 같다.

$$S_A = 2.865 + j2.670\ [kVA]$$
$$S_B = 2.747 + j2.708\ [kVA]$$
$$S_C = 2.751 + j2.738\ [kVA]$$

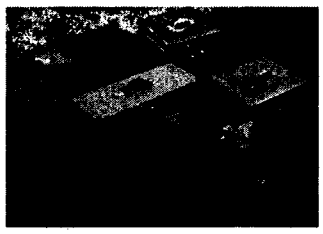


그림 4. 고조파 발생장치의 외관
Fig. 4. Outside view of harmonic generating equipment

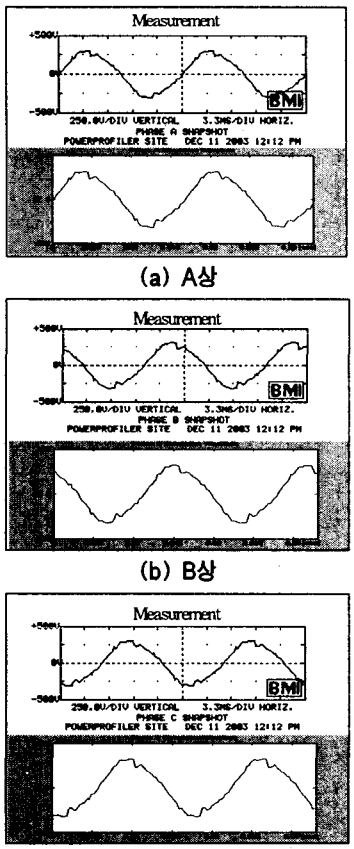


그림 5. 전압 파형 비교
Fig. 5. Voltage waveform comparisons between measurements and simulation

BMI 장비로 측정한 전압파형과 MATLAB[6]으로 고조파 해석용 등가회로(그림 3)에 실측한 데이터를 적용하여 시뮬레이션 한 전압파형을 그림 5에 나타내었다.

표 1은 전압의 측정치와 시뮬레이션 값을 비교한 것이다.

표 1. 전압 비교
Table 1. Voltage comparisons between measurements and simulation

		측정	시뮬레이션
A상	$V_{A\ [Vrms]}$	211.9	211.5
	$V_{THD,A[\%]}$	10.1	10.31
B상	$V_{B\ [Vrms]}$	216.3	215.8
	$V_{THD,B[\%]}$	10.7	10.71
C상	$V_{C\ [Vrms]}$	216.1	216.3
	$V_{THD,C[\%]}$	10.6	11.02

그림 6은 측정한 전류파형과 시뮬레이션 한 전류파형을 나타낸다.

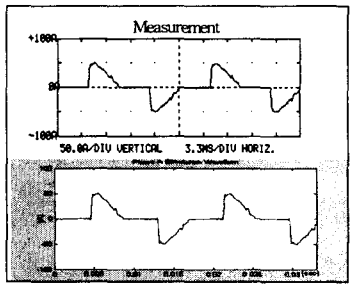
표 2는 전류의 측정치와 시뮬레이션 값을 비교한 것이다.

표 2. 전류 비교
Table 2. Current comparisons between measurements and simulation

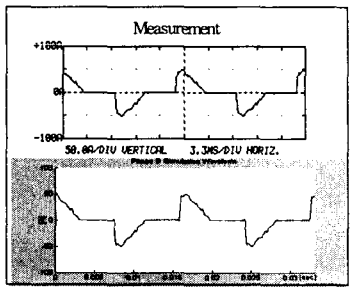
		측정	시뮬레이션
A상	$I_{A\ [Arms]}$	23.5	23.42
	$I_{THD,A[\%]}$	68.8	68.7
B상	$I_{B\ [Arms]}$	22.9	22.67
	$I_{THD,B\ [\%]}$	70.7	70.86
C상	$I_{C\ [Arms]}$	22.9	22.82
	$I_{THD,C\ [\%]}$	69.5	69.91
N상	$I_{N\ [Arms]}$	34.5	34.48
	$T_{HD,N\ [\%]}$	3509.5	4405.0

3.2 접지 임피던스 모델링

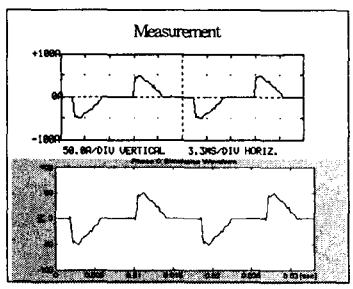
사례연구에 적용한 접지 시스템은 동양 산전(주)에서 상용화 시킨 접지판(매직판[7])을 매설하여 구성한 것이다. 그림 7은 사용된 매직판의 외관이다.



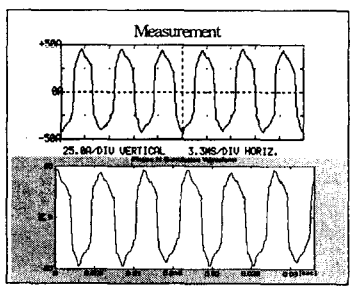
(a) A상



(b) B상



(c) C상



(d) N상

그림 6. 전류 파형 비교
Fig. 6. Current waveform comparisons between measurements and simulation

크기는 200W x 1000L x 40T[㎜]이고, 고강도 시멘트 및 탄소 섬유 등을 혼합하여 제조한 제품으로 토양과의 친화, 접지 전극의 부식 방지, 우수한 도전성,

접지 효과를 장기간 유지하게 되는 특징을 가지고 있다.

그림 7. 매직판의 외관
Fig. 7. Outside view of Magic plate

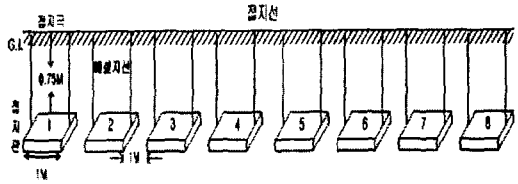
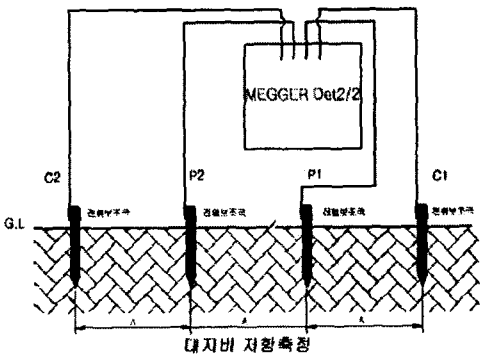
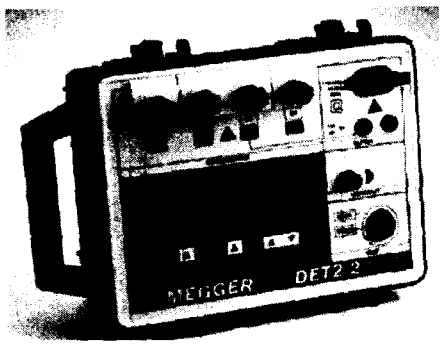


그림 8. 접지 시스템 구성
Fig. 8. Ground system configuration



(a) 회로구성



(b) 측정 장비 외관

그림 9. 대지 고유 저항률 측정구성도와 장비 외관도
Fig. 9. Measuring configuration and outside view of the equipment

그림 9는 Wenner 4 전극법 으로 대지 고유 저항률을 측정하는 설명이다. 전위전극(P1,P2), 전류전극(C1,C2)을 배치하고, 각 전극간의 거리(A)가 등 간격이 되도록 한다. 전극 간격을 0.5-15[m]까지 변화시키면서 측정한 결과는 표 3에 간추려 놓았다. 측정장비는 AVO사의 모델 MEGGER DET2/2[7]이다.

표 3. 대지 고유 저항률 측정값
Table 3. Measured soil resistivity

간격(m)	0.5	1	2	3	4	5	6	7	10	15
대지고유저항 (Ω -m)	199	160	151	153	145	133	127	119	71	46

접지 저항 측정은 MEGGER DET2/2 장비로 전위 강하법 (Fall-of-potential method) 원리로 측정하였다. 61.8[%] 법칙에 따라 접지 전극과 전압 보조극 사이는 12.36[m], 전압 보조극과 전류 보조극 간격은 7.64[m]으로 하여 측정한 접지 저항 Rg 값은

$$Rg = 13.8\,[\Omega]$$

이었다.

접지 임피던스 모델의 정수 R, L, C 를 구하기 위해서 접지해석 프로그램인 CDEGS (Current Distribution, Electromagnetic fields, Grounding and Soil Structure Analysis)[9,10,11]를 사용하여 정수 값을 추정하고자 한다.

MEGGER DET2/2 장비로 측정한 대지 고유저항률 데이터(표 3)를 CDEGS 프로그램으로 Curve fitting하면 그림 10과 같이 측정 데이타와 등가인 2층 구조의 토양 모델을 구할 수 있다.

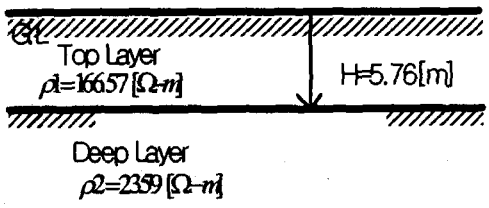


그림 10. 2층 구조 접지 토양 모델
Fig. 10. Two - layer earth model

CDEGS 프로그램으로 접지 임피던스를 계산한다. 접지판은 8 x 2 mesh 형태로 하고, 그림 10의 토양 모델과 그림 8의 접지 시스템 데이터를 입력하여 계산한 접지 임피던스는 표 4에는 수치로, 그림 11은 그래프로 나타내었다.

표 4. 접지 임피던스
Table 4. Ground impedance

Frequency f[Hz]	Harmonic Order h	Ground impedance $Zg[\Omega]$
0	0	11.3445
60	1	$11.3441+j5.66\times10^{-4}$
180	3	$11.3445+j6.72\times10^{-3}$
300	5	$11.3446+j1.12\times10^{-2}$
420	7	$11.3448+j1.56\times10^{-2}$
540	9	$11.3449+j2.0\times10^{-2}$
660	11	$11.3451+j2.44\times10^{-2}$
780	13	$11.3453+j2.87\times10^{-2}$
900	15	$11.3456+j3.3\times10^{-2}$
6600	110	$11.3621+j0.22714$

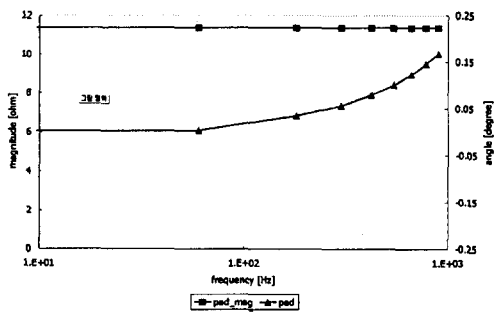


그림 11. 접지 임피던스의 주파수 특성
Fig. 11. Frequency characteristics of ground impedance

사례연구 시스템의 접지 임피던스는 고조파 전류(일반적으로 50고조파 차수 이하)에서는 주파수 변화에 크게 민감하지 않으므로 그림 2와 같이 R, L, C 회로로 나타낼 수가 있다.

접지 임피던스 Zg는

$$Zg=\frac{R}{1+(wCR)^2}+j[wL-\frac{wCR^2}{1+(wCR)^2}]=Rg+jXg$$

이고, Rg는 dc 저항값인 11.3445[Ω]이라 하고, 저항 R은 고조파 범위 60-900[Hz]에서 평균값인 11.3449 [Ω]으로 하면, 커패시턴스 C 값은 다음과 같이 계산된다.

$$Rg=\frac{R}{1+(wCR)^2}$$

$$C=\frac{\sqrt{\frac{R}{Rg}-1}}{wR}$$

$$=\frac{\sqrt{\frac{11.3449}{11.3445}-1}}{377\times11.3449}=1.3883\ [\mu F]$$

또한 리액턴스 Xg는 고조파 범위 60-900[Hz]에서 평균값인 0.01752[Ω]으로 하면, 인덕턴스 L값은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Xg=wL-\frac{wCR^2}{1+(wCR)^2}$$

$$L=\frac{Xg}{w}+\frac{CR^2}{1+(wCR)^2}$$

$$=\frac{0.01752}{377}+\frac{1.3883\times10^{-6}\times11.3449^2}{1+(3.77\times1.3883\times10^{-6}\times11.3449)^2}$$

$$=0.2252\ [mH]$$

즉, 접지 임피던스 모델의 정수 값은 다음과 같이 요약된다.

$$R=11.3449\ [\Omega]$$
$$L=0.2252\ [mH]$$
$$C=1.3883\ [\mu F]$$

3.3 시스템 응답 특성

고조파 해석 등가회로 모델에 중성선 고조파 전류가 흐를 때, 접지극의 전압, 즉 대지와 접지극간의 전압 V_{NG}는

$$V_{NG}=Zg\times I_N\ [V]$$

으로 되고, 전압 파형은 실측한 중성선 전류 I_N과 접지 임피던스 Zg의 곱으로 된다. 그림 12는 접지극 전압 파형으로, 실효치는 390[V_{rms}]이고, 전압 왜형율은 4407[%]이다.

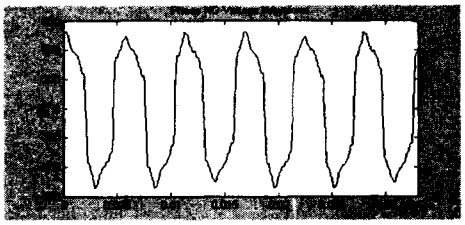


그림 12. 접지극 전압파형
Fig. 12. Neutral-to-ground voltage waveform

그림 13은 그림 8의 접지극에 파두치 10[kA], 파두장 1.5[μs], 파미장 20.0[μs]인 임펄스 전류가 유입될 때의 전위 상승을 CDEGS 프로그램을 이용하여 계산한 결과이다. 계산방법은 표 4에서 구한 것과 같이 전류주입점에서의 주파수별 임피던스를 계산하여 이를 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)함으로써 아래와 같은 시간영역 파형으로 합성한다.

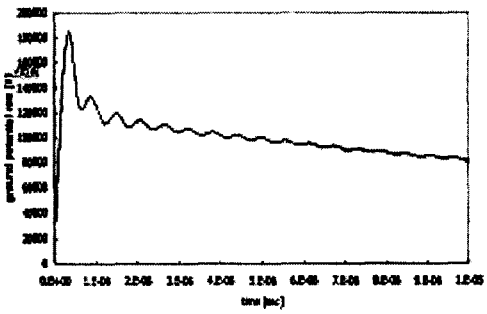


그림 13. 접지점의 전위
Fig. 13. Transient potential at grounding point

4. 결 론

비선형 부하의 증가로 고조파가 많이 발생하고, 고조파로 인한 장해가 증가하는 추세이다. 고조파 해석용 3상 등가회로를 모델링 하였다. 전압원은 기본파의 전압원과 고조파 전압원을 직렬로 연결하고, 비선형 부하는 측정된 전력으로 기본파 성분의 선형 임피던스 부하와 고조파 전류원을 병렬로 연결하여 구성 하였다. 중성선은 접지 임피던스와 직렬로 연결 하였고, 접지 임피던스는 간단한 저항, 커패시턴스와 인덕턴스의 조합으로 구성하였다.

사례연구 시스템을 MATLAB으로 시뮬레이션 한 전류 및 전압값은 측정한 값과 오차 없이 만족할 만한 결과를 얻었다. 중성선 전류의 경우, 측정치는 실효치 34.5[A], 왜형율 3509.5[%]이었고, 시뮬레이션 값은 실효치 34.38[A], 왜형율 4405[%]로 나타났다. 접지 임피던스는 계측장비로 측정한 결과 13.8[Ω]이었고, 측정한 대지 고유저항율과 접지 시스템 형태를 CDEGS로 계산한 값은 11.34[Ω]이었다. 접지 임피던스는 주파수의 영향을 받으므로 CDEGS로 계산한 임피던스를 근거로 고조파 해석용 접지 임피던스 모델의 정수값은 저항 11.3449[Ω], 인덕턴스 0.2252[mH], 커패시턴스 1.3883[μF]을 구할 수 있었다.

접지시스템은 공중의 안전과 절연의 적합성 등에 중요한 요인이 되므로, 사례연구 시스템의 응답 특성을 알아보았다. 중성선 전류 34.48[A], 왜형율 4405[%]가 유입될 때, 접지극의 전압은 실효치 390[V], 왜형율 4407[%]로 계산 되었다.

향후 같은 사례연구 시스템에 IEEE 표준으로 시험하여 과도상태의 접지 임피던스를 모델링 할 계획이다.

본 연구는 전력산업 기술개발사업으로 수행되었음.

References

[1] IEEE Std 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", IEEE Inc, April 1993.
[2] IEEE Std 81-1983, " IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System", IEEE Inc, 1983.
[3] I.F. Gonos, F.V Topalis and I.A. Stathopulos, "Transient Impedance of Grounding Rods", IEEE High Voltage Engineering Symposium, August 1999.
[4] "고조파 발생장치 사양서", (주) 피에스디테크, 2002.
[5] "3030A Profiler ", Dranetz BMI, 2000.
[6] "MATLAB User's Manual", Math Work, 2002.
[7] "매직 접지봉 사양서", 동양 산전(주), 2002.

[8] "Digital Earth Tester Model MEGGER DET2/2", AVO International Ltd, 2000.
[9] "CDEGS Users' Guide", SES & Technologies Ltd, 2003.

◇ 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.

최종기 (催鍾基)
1969년 2월 1일생. 1992년 동국대학교 전기공학과 졸업. 1995년 홍익대학교 전기기제어공학과 석사. 1995~현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.

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) 연구원.