

현장시험에 의한 중성선 고조파 해석용 접지 임피던스 모델링

김경철, 백승현, *최종기, **이일무, ***김종욱
 홍익대학교, *전력연구원, **피에스디텍(주), ***동양산전(주)

The Ground Impedance Modeling for Neutral Harmonic Analysis by Field Tests

Kyung-Chul Kim, Seung-Hyun Paik, *Jong-Ki Choi, **Il-Moo Lee, ***Jong-Uk Kim
 Hongik University, *KEPRI, **PSDTech Corporation, ***Dongyang Corporation

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.

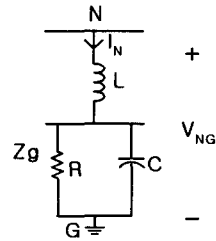


그림 1. 접지 임피던스 모델

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

$$Z_g = j\omega L + \frac{R}{1 + \frac{1}{j\omega C}} \quad (1)$$

$$= \frac{R}{1 + (\omega CR)^2} + j[\omega L - \frac{\omega CR^2}{1 + (\omega CR)^2}] \quad [4]$$

1. 서론

비선형 부하로 인하여 중성선에 많은 고조파 전류가 흐른다. 과다한 중성선 고조파 전류는 중성선 과열, 통신선 잡음, 전기 전자 장비의 오동작 등 많은 고조파 장해를 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 접지 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 모델링 하고자 한다.

2 고조파 해석용 등가회로 모델

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

2.1 접지 임피던스 모델

접지 임피던스는 토양의 특성, 대지 저항률, 온도, 습도, 접지체 모양과 접속 상태 등 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하므로 접지 임피던스를 모델링 하기는 쉽지 않다[2]. 본 논문에서 사용하고자 하는 고조파 해석용 접지 임피던스 모델은 참고 문헌[4]에서 제시한 저항 R, 인덕턴스 L, 커패시턴스 C의 조합으로 그림 1과 같다.

2.2 시스템 모델

측정점 에서 본 비선형 부하의 3상 등가회로는 그림 2와 같이 유도 된다

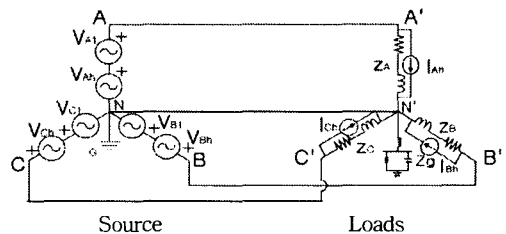


그림 2. 고조파 해석용 3상 등가회로

3. 사례 연구

사례연구에서는 접지 시스템을 구성하고, 계측기로 대지 고유 저항률과 접지 저항을 측정한다. 접지 임피던스 측정 시스템을 구성하고, 전위강화법[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[5])을 회사 부지 내에 매설하여 구성하였다. 매직봉의 사양은 $\phi 100 \times L1500$ [mm]이고, 고강도 도전성 모르터 및 무기물질 등을 혼합하여 내구성 0.03[%], 압축강도 410[kg/cm²]의 특징을 가지고 있다. 접지 시스템의 구성은 그림 3와 같다. 7개의 매직봉을 5개는 7.5[m] 간격으로 7.5[m]를 매설하고 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 직선은 GV전선 38[mm]를 사용하여 접지망을 구성하였다.

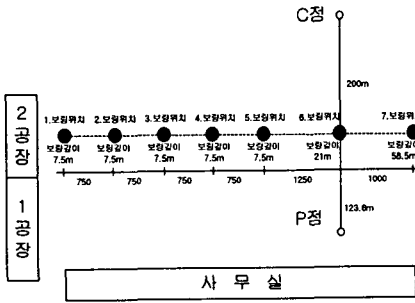


그림 3. 접지 시스템 구성

3.2 대지 고유 저항률 측정 및 접지 저항 측정

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 변화 시키면서 측정하였다. 접지 저항 측정은 MEGGER DET2/2 장비로 전위 강하법[2] (Fall-of-potential method)원리로 측정하였다. 61.8[%] 법칙[6]에 따라 접지 전극과 전류 보조극 사이는 200[m], 접지 전극과 전압 보조극의 간격은 123.6[m]로 측정한 접지 저항 Rg 값은 $R_g = 2.54[\Omega]$ 이다.

3.3 접지 임피던스 측정 시스템 구성 및 측정

그림 4는 접지 임피던스 측정시스템의 구성을 보인 것이다.

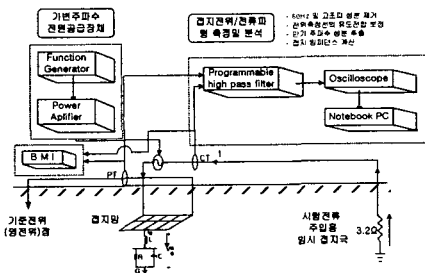


그림 4. 접지 임피던스 측정 시스템

접지 임피던스 측정 시스템은 임의로 선택한 주파수의 전류를 접지극으로 주입시키면서 접지 전위와 전류 파형

을 측정하여 접지 임피던스를 계산한다. BMI 장비[7]는 고조파 전류와 고조파 접지전압을 측정하는데 사용된다. 그림 5는 오실로스코프로 측정된 접지 임피던스의 주파수 특성 그래프이다.

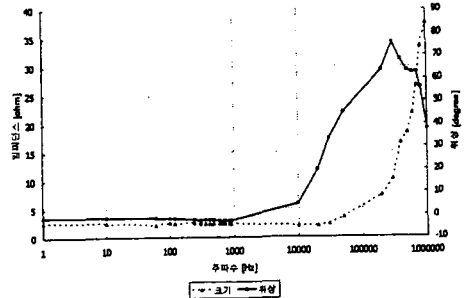


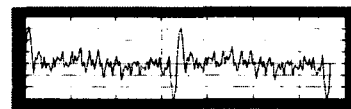
그림 5. 접지 임피던스의 주파수 특성

BMI 장비로 측정된 실측치는 표 3에 간추려 놓았다.

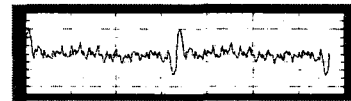
표 1. BMI 장비로 측정된 접지 임피던스

| 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 | 0.394 | 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 | 2.635 | -2.6 |
| 840 | 14 | 1 | 0.381 | 2.635 | -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 6은 BMI로 측정된 전압파형과 전류파형을 나타낸다.



(a) 전압파형



(b) 전류파형

그림 6. BMI로 측정된 전압 파형

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,

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

이 된다. BMI로 측정된 전류(Imea)와 전압(Vmea)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 7과 같이 Pattern Search법은 L과 C를 변화시키면서 실측된 V_{mea} 값(실효치)과 파형(THD, total harmonic distortion)을 시뮬레이션 한 V_{sim} ($I_{mea} * Z_g$) 값과 파형을 비교하여 오차가 일정 범위 내에 들 때 까지 반복하여 구하면 된다.

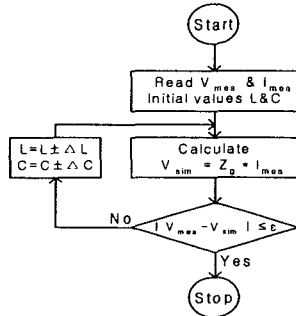


그림 7. PSM 순서도

Pattern Search법으로 구한 값은 다음과 같다.

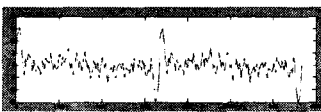
$$L = 0.203 [mH]$$

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

그림 8은 접지 임피던스 모델에 R, L, C값을 넣고, 측정된 전압(V_{mea})과 시뮬레이션 한 전압(V_{sim})파형을 비교한 그래프이다.



(a) 측정



(b) 시뮬레이션

그림 8. 전압 파형

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

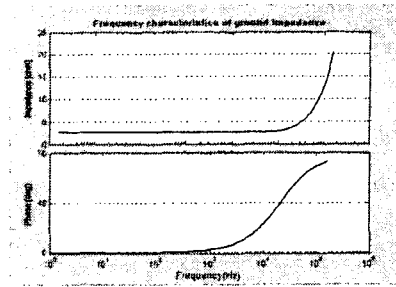


그림 9. 접지 임피던스의 Bode diagram

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 [Ω], 인덕턴스 0.203 [mH], 커패시턴스 0.027 [μF]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.

[참 고 문 헌]

- [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 HR. Martens, "Discrete-time and Computer Control System", Prentice-Hall Inc, 1970.
- [4] 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.
- [5] "매직 접지봉 사양서", 농양 신전(주), 2002.
- [6] 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.
- [7] "3030A Profile", Dranetz BM, 2000.
- [8] "MATLAB User's Manual", Math Work, 2002.