

매설지선의 유효길이 산정에 관한 이론적 해석

이복희, 김정철*, 김종호, 유재덕, 김동규
인하대학교 전기공학과

Theoretical Analysis of Determination of Effective Length of Counterpoise

Bok-Hee Lee, Jung-cheol Kim*, Jong-Ho Kim, Jae-Duk Yoo, Dong-Kyu Kim
Inha University Electrical engineering department

Abstract - Lightning currents are one of major influences on the dynamic performance of counterpoise. High lightning current causes the dynamic grounding performance of counterpoise due to very fast fronted pulses. The previous analysis has often been based on quasi-static approximation that can not be applicable to very fast fronted pulses. To extend the analysis for fast fronted pulses in this paper, the full-wave analysis method based on the rigorous electromagnetic-field theory approach is used and the effects of the ionization of the soil are disregarded. Based on the simulation results, the empirical formulas applicable for slow and fast fronted lightning current pulses are reviewed; therefore, the validity of the theoretical approach is verified through comparison between the calculated and measured results.

1. 서 론

접지의 목적은 피보호 시스템의 내부에서 발생하거나 외부에서 유입된 이상전압을 저감시키고, 이상전류를 대지에 효과적으로 방류시켜 전위상승을 억제함으로써 기기의 파손방지와 인체의 안전을 도모하는 것과 접지시스템 전위의 균등화 및 안정된 기준점을 제공하여 전기설비의 안정과 기능의 향상을 도모하는 것이다[1]. 접지전극에 뇌임펄스전류 등과 같은 이상전류가 인가되었을 경우 그 정도가 심하면 피보호시스템의 목적을 달성하지 못하고 인명과 재산상의 큰 손실을 초래 한다[2]. 상용주파수에서의 접지시스템의 특성은 매우 잘 알려져 있다. 하지만, 접지전극에 뇌임펄스전류와 같이 고주파수를 포함하여 급격하게 변화하는 전류가 유입 되었을 때의 과도상태에 대한 연구는 현재까지도 매우 미흡하다. 빠른 과도시간동안 접지전극은 높은 과도접지 임피던스 값을 나타내며 매우 복잡한 특성을 나타낸다[3],[4]. 과도상태에서 인체안전 및 전기설비를 보호하는 접지시스템을 어떻게 하면 효율적이며 안정적으로 설계를 할 수 있는가에 대한 고민은 접지전극의 유효길이를 어떻게 정의하고 산출할 수 있는 가라는 문제로 볼 수 있다. B. R. Gupta, Leonid Grcev, Jinliang He 의 연구에서도 볼 수 있듯이 접지전극의 과도상태에서 유효 길이의 특성을 분석하는 연구가 현재까지 끊임없이 진행되어 오고 있다[5-8].

본 논문에서는 뇌서지 전류에 대한 최적의 성능과 특성을 가지는 매설지선의 유효길이를 산정하는 기법을 제안할 목적으로 실증실험을 수행하고[3],[4], 모델링을 통하여 모의규약접지임피던스를 이론적으로 해석하였다. 임펄스전류에 의한 토양의 이온화현상은 과도상태에서 접지시스템의 성능을 향상시키는 요소이나 접지시스템의 안정성을 고려하여 무시하였다[9]. 규약접지임피던스와 모의규약접지임피던스를 비교분석하여 본 연구에서 제안하는 매설지선의 유효길이의 결정방법의 타당성을 검증하였다.

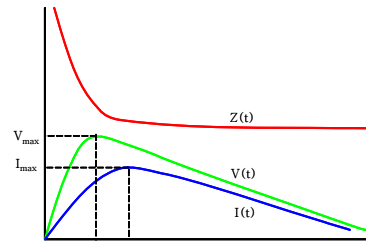
2. 이 론

2.1 규약접지임피던스의 정의

규약접지임피던스는 뇌임펄스전류와 같은 이상전류가 인가되었을 때 발생하는 입력전류의 최대값과 출력전압의 최대값의 비를 말한다. 뇌임펄스전류에 대한 규약접지임피던스의 특성곡선을 식 (1)로 정의하고, 이의 개요를 그림 1로 나타내었다.

$$Z = \frac{V_{max}}{I_{max}} \quad (1)$$

Z : 규약접지임피던스, I_{max} : 입력임펄스전류의 최대값,
 V_{max} : 접지전극전위의 최대값



〈그림 1〉 규약접지임피던스의 정의

2.2 임펄스계수의 정의

접지전극시스템의 정상접지저항에 대한 규약접지임피던스의 비를 임펄스계수로 정의하고 식 (2)에 나타내었다[5],[6].

$$A = \frac{Z}{R} \quad (2)$$

A : 임펄스계수, Z : 규약접지임피던스, R : 접지저항

2.3 유효길이의 정의

B. R. Gupta, Leonid Grcev, Jinliang He 의 연구에서도 볼 수 있듯이 과도상태에서 접지전극의 유효길이는 다양한 정의와 해석이 존재한다[5-8]. 본 논문에서는 뇌임펄스전류가 과도시간동안 접지전극의 인가위치에서 부터 접지전극을 이동한 거리로 정의한다[11],[12].

2.3.1 접지전극의 길이와 유효길이의 상관관계

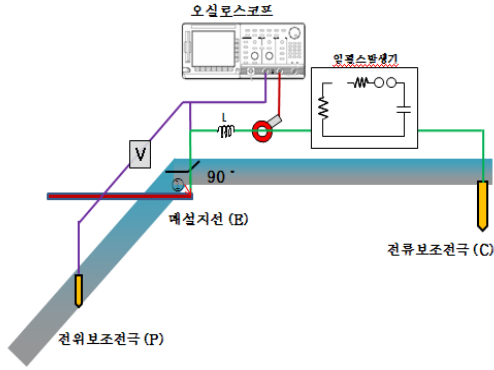
매설지선의 길이 l 과 유효길이 l_{eff} 관계에 따라 3가지로 수평매설접지전극의 특성을 구분한다.

- (1) $l > l_{eff}$: 접지전극의 길이가 유효길이보다 긴 경우로 그 과도영역 안에 속하는 임펄스피크전류에 대해서 고유의 접지전극의 역할을 한다.
- (2) $l = l_{eff}$: 접지전극의 길이와 유효길이가 동일한 경우로 그 과도영역에 속하는 임펄스피크전류에 대해서 접지전극의 역할을 하는 임계점이다.
- (3) $l < l_{eff}$: 접지전극의 길이보다 유효길이가 긴 경우로 그 과도영역 안에 속하는 임펄스피크전류에 대해서 접지전극의 역할을 완전하게 하지 못한다.

3. 실측 실험

3.1 규약접지임피던스의 측정

매설지선의 규약접지임피던스를 측정하기 위하여 그림 2와 같이 IEEE81.2-1991에서 권고하는 측정 방법을 이용하였다[13]. 전류보조전극(C극)과 전위보조전극(P극)을 90°로 배치하여 전자유도를 최소화 하였고 도선유도에 의한 오차가 5% 미만인 되는 조건으로 매설지선의 규약접지임피던스를 측정하였다. 단면적 25 mm², 길이 10 m, 30 m인 매설지선을 지표면으로부터 깊이 0.5 m 에 설치하였다.



〈그림 2〉 실험계의 구성

3.2 접지저항측정 실험 결과

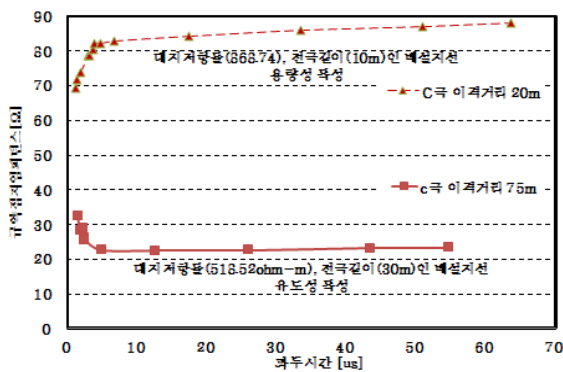
접지저항을 측정한 후 E. D. Sunde 의 매설지선의 접지저항을 계산하는 식 (10)을 이용하여 대지저항률을 산출하였다

〈표 1〉 접지저항 실측 실험 결과

매설지선 길이 [m]	접지저항 [ohm]	대지저항률 [ohm·m]
10	99.8	868.73
30	29	518.52

3.3 규약접지임피던스 실험 결과

그림 3은 3.1절의 실험방법을 통하여 얻은 접지전극의 규약접지임피던스의 실측값이다. 대지저항률과 임펄스전류의 파두시간에 의해 접지전극의 규약접지임피던스의 결과값이 용량성 또는 유도성특성으로 나누어지는 결과를 얻었다. 대지저항률과 접지전극의 길이에 따라 접지전극의 규약접지임피던스가 그림 3의 결과처럼 용량성 또는 유도성 특성으로 나누어지는 결과는 여러 논문에서 많이 발표되어 있다[15].



〈그림3〉 규약접지임피던스 실측 실험 결과

4. 모델링

4.1 Gupta & Tharpar 모델

대지저항률과 임펄스파두시간을 변수로 하여 유효길이를 식 (3)으로 정의하고, 임펄스계수를 식 (4)로 각각 정의한다[5].

$$l_{eff} = 1.4 \sqrt{\rho T_1} \quad (3)$$

$$A = e^{0.333(l/l_{eff})^{2.3}} \quad (4)$$

ρ : 대지저항률, T_1 : 임펄스전류의 파두시간, l : 접지전극의 길이

4.2 Leonid Grcev 모델

대지저항률과 임펄스의 파두시간을 변수로 하여 임펄스계수를 식 (5)로 식 (6)을 적용해 임펄스계수를 산출한다[4]. 실제전극의 길이가 유효길이 l_{eff} 보다 짧거나 같으면 임펄스계수는 1이 된다. 본 모델의 유효길이 l_{eff} 는 식 (7)을 이용해 산출한다[6].

$$A = 1, \quad (l \leq l_{eff}) \quad (5)$$

$$A = \alpha l + \beta, \quad (l \geq l_{eff}) \quad (6)$$

$$l_{eff} = \frac{1 - \beta}{\alpha} \quad (7)$$

실제 매설지선의 길이 l 과 모델링을 통해 산출한 유효길이 l_{eff} 의 길이차이에 따라 임펄스계수를 식 (5)과 식 (6)으로 각각 다르게 적용하여 매설지선의 임펄스계수를 산출한다. 또한 임펄스계수 식 (6)과 유효길이 식 (7)에 적용된 α 와 β 는 아래의 식 (8)과 식 (9)을 통하여 산출한다.

$$\alpha = 0.025 + e^{-0.82(\rho \cdot T_1)^{0.257}} \quad (8)$$

$$\beta = 0.17 + e^{-0.22(\rho \cdot T_1)^{0.555}} \quad (9)$$

ρ : 대지저항률, T_1 : 임펄스전류의 파두시간

4.3 모의규약접지임피던스

E. D. Sunde 의 매설지선의 접지저항을 계산하는 식 (10)과 실측한 접지저항값을 이용하여 대지저항률 ρ 를 산출한 후 임펄스전류의 파두시간 T_1 을 이용하여 임펄스계수를 구한다[14]. 식 (11)을 이용하여 모의규약접지임피던스 Z_s 을 산출한다.

$$R = \frac{\rho}{\pi l} \left[\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2ad}} \right) - 1 \right], \quad (l \gg a) \quad (10)$$

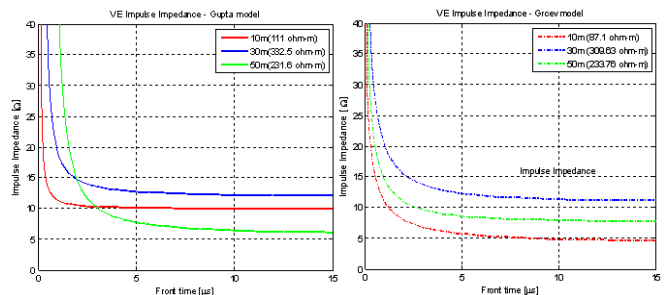
R : 실측접지저항, l : 접지전극의 길이, a : 접지전극의 반지름

$$Z_s = R \cdot A \quad (11)$$

Z_s : 모의규약접지임피던스

5. 규약접지임피던스 모델 결과 비교

그림 4은 식 (4)와 식 (5)을 이용해 수직매설 접지전극의 임펄스임피던스를 모델링으로 산출한 결과이다[16]. Gupta 모델의 경우 대지저항률과 접지전극에 따라서 규약접지임피던스가 심하게 왜곡되는 특성을 보였기 때문에 Grcev 모델을 선정하여 매설지선의 유효길이를 하였다.



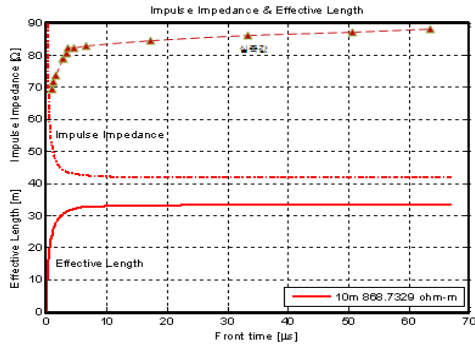
〈그림 4〉 임펄스 접지임피던스의 비교

6. 유효길이 모델링 결과

6.1 10m 매설지선 결과 비교

그림 5는 임펄스인가전류의 파두시간의 변화에 따른 10m 매설지선 (868.73 ohm·m)의 규약접지임피던스(실측값), 모의규약접지임피던스

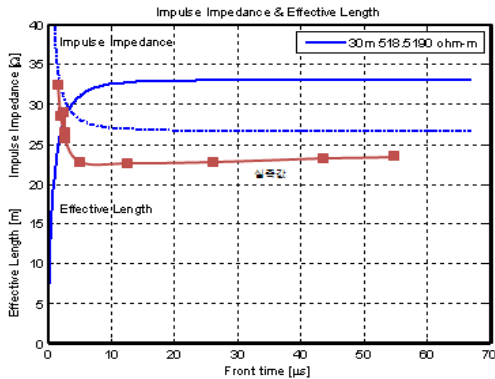
(Impulse Impedance), 유효길이(Effective Length)의 특성곡선의 변화를 나타내고 있다. 10m 매설지선의 실측값인 규약접지임피던스는 용량성 특성을 나타내는 반면 모델링 통하여 산출한 모의규약접지임피던스는 유도성 특성을 나타내기 때문에 매설지선이 10m 길이이고 868.73 ohm-m의 대지저항률을 가진 대지에서는 적용이 불가능하다는 것을 보여준다. 본 모델은 유도성 특성을 지닌 접지전극에 대해서만 적용이 가능하다는 것을 알 수 있다. 접지전극을 대지저항률과 접지전극의 길이에 따라서 용량성 또는 유도성으로 구분하는 방법은 다음 논문을 참조할 수 있다[15].



〈그림 5〉 10m 매설지선(868.7 ohm-m)의 결과비교

6.2 30m 매설지선 결과 비교

그림 6은 임펄스인가전류의 파두시간의 변화에 따른 30m 매설지선(대지저항률 518.519 ohm-m)의 규약접지임피던스(실측값), 모의규약접지임피던스(Impulse Impedance), 유효길이(Effective Length)의 특성곡선의 변화를 나타내고 있다. 실측실험을 통하여 얻은 규약접지임피던스와 모델링을 통하여 얻은 모의규약접지임피던스의 추세가 근사한 것을 알 수 있다. 하지만 임펄스전류가 3.5us보다 긴 파두시간을 가지는 경우 규약접지임피던스는 2~4 ohm 정도의 오차가 발생하였다가 후후 30m 매설지선의 접지저항값인 29 ohm에 수렴해가는 것을 볼 수 있다.



〈그림 6〉 30m 매설지선(518.5 ohm-m)의 결과비교

7. 결 론

대지저항률이 518.52 ohm-m인 30m 매설지선의 경우 파두시간이 약 3.5 us보다 짧은 영역에서 파두시간이 3.5 us인 영역까지 규약접지임피던스의 결과값과 모의규약접지임피던스의 결과값 모두 급격하게 떨어지는 동일한 추세를 보여주고 있다. 또한 파두시간이 약 3.5 us보다 길어지는 영역에서 규약접지임피던스 값과 모의규약접지임피던스 값이 접지저항값보다 2~4 ohm 정도 다소 낮기는 하지만 접지저항값(29 ohm)에 수렴해 가는 추세 또한 동일하게 확인 할 수 있었다.

이전의 연구인 수직매설 접지전극의 실험에서도 규약접지임피던스와 모의규약접지임피던스의 결과값의 추세변화에 따라서 접지전극의 유효길이가 달라지는 특성을 동일하게 확인할 수 있었다[15].

본 논문에서 매설지선특성을 실측 결과와 이론적 결과를 종합하면, 대지저항률이 518.52 ohm-m인 30m 매설지선의 경우, 임펄스 전류가 접지전극에 인가되었을 때, 파두시간이 3.5us보다 빠른 임펄스전류가 인가되면 접지전극에 과도특성이 나타난다. 이 때 유효길이는 실제 매설지선의 길이보다 짧게 산출되었다($l > l_{eff}$). 그리고 파두시간이 3.5us의 임펄스 전류가 인가되는 경우 규약접지임피던스는 과도영역에서 정상상태영역으로 넘어오는 변곡점을 형성하며, 이때 유효길이는 실제 매설지선의 길이와 동일하게 산출되었다($l = l_{eff}$). 마지막으로 파두시간이 3.5us보다 느린 임펄스 전류가 인가되었을 때, 규약접지임피던스는 접지저항에 근사한 값을 가지게 되며 정상상태영역에 있게 된다. 이때 유효길이는 실제 매설지선의 길이보다 길게 산출되었다($l < l_{eff}$).

이것은 대지저항률이 동일한 대지에 매설된 접지전극의 경우 유효길이는 접지전극에 인가되는 임펄스전류의 파두시간에 따라서 접지전극이 임피던스특성을 지니는 과도영역에서 유효길이는 실제 매설된 접지전극의 길이보다 짧게 산출되며, 임피던스특성에서 접지저항의 특성을 지니는 변곡점에서 실제 매설된 접지전극의 길이와 유효길이가 같아지며, 변곡점을 지나 접지저항값에 수렴하는 정상상태영역에서 실제 매설된 접지전극의 길이보다 유효길이가 길어진다 결론을 내릴 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이복희, 이승철, “접지의 핵심 기초 기술”, 도서출판 의제, pp.4-20, 1999.
- [2] 이복희, 이승철, “정보통신설비의 뇌보호”, 인하대학교 출판부, pp.38-46, 2004.
- [3] 임주홍, “A New Analysis Method for Evaluating the Frequency Dependence of Grounding System Impedances”, 인하대학교 대학원, pp.48-74, 2004
- [4] 장근철, “Transient Impedance Characteristics of Deep-driven Ground Rods”, 인하대학교 대학원, pp.26-34, 2004.
- [5] B. R. Gupta and B. Thapar, “Impulse impedance of grounding systems”, in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, Paper A 78563-9. 1978, pp. 1 - 6.
- [6] L. Grcev, “Grounding electrodes impulse efficiency”, IEEE Trans. Power Delivery, 2008, to be published.
- [7] Jinliang He, Yanqing Gao, Rong Zeng, Jun Zou, Xidong Liang, Bo Zhang, Jaebok Lee and Chang. S., “Effective length of counterpoise wire under lightning current”, Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 20, Issue 2, Part 2, April 2005 Page(s):1585 - 1591
- [8] Gonos I.F., Topalis F.V. and Stathopoulos I.A., “Transient impedance of grounding rods”, High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. No. 467) Volume 2, 23-27 Aug. 1999 Page(s):272 - 275 vol.2.
- [9] 박건훈, “Soil Ionization Phenomena around a Ground Electrode Stressed by Impulse Currents, 임펄스전류에 의한 접지전극 주변 토양의 이온화 현상”, 인하대학교 대학원, pp.28-70, 2009.
- [10] KS C IEC 62305-1, “피뢰시스템-제1부: 일반원칙”, pp.3-15, 2007
- [11] L. Grcev, “Effective area of earthing systems under lightning surge conditions”, 2008. ICLP Uppsala, Sweden, 28th International Conference on lightning Protection on pp.5a-8-1-5a-8-3.
- [12] L. Grcev, “Impulse efficiency of simple grounding electrode arrangements”, Electromagnetic Compatibility, 2007. EMC Zurich 2007. 18th International Zurich Symposium on 24-28 Sept. 2007 Page(s):325 - 328.
- [13] IEEE Std 81.2-1991, “IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems”, IEEE Inc., pp.1731, 1991.
- [14] E. D. Sunde, “Earth Conduction Effects in Transmission Systems”, 2nd ed. New York: Dover, 1968.
- [15] Leonid Grcev, “Modeling of grounding systems for better protection of communication installations against effects from electric power system and lightning”, IEEE Conf. pub., No. 484 pp. 461-468, 2001
- [16] 이복희, 김정철, “수직매설 접지전극의 유효길이 산정에 대한 이론적 해석”, 춘계학술대회. 한국조명전기설비학회, 2009