

# 수직매설 접지전극의 유효길이 산정에 대한 이론적 해석

(Theoretical Analysis for Determination of Effective Length of Vertically-Driven Ground Rod)

이복희 · 김정철\* · 김종호 · 유재덕 · 김동규 · 이수봉

(Bok-Hee Lee · Jung-Cheol Kim\* · Jong-Ho Kim · Jae-Duk Yoo · Dong-Kyu Kim · Su-Bong Lee)

인하대학교 IT 공과대학 전기공학부

## Abstract

Lightning currents are one of major influences on the dynamic performance of ground electrodes. High lightning current intensity changes in the dynamic grounding performance due to ionization of the soil and very fast fronted pulses. The previous analysis has often been based on quasi-static approximation that is not applicable to very fast fronted pulses. To extend the analysis to 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 very 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 서론

접지의 목적은 피보호 시스템에 내부에서 발생되거나 외부에서 유입된 이상전압을 저감시키고, 이상전류를 대지에 효과적으로 방류시켜 대지전위상승을 억제함으로써 기기의 파손방지와 인체의 안전을 도모하는 것과 접지시스템 전위의 균등화 및 안정된 기준점을 제공하여 전기설비의 안정과 기능의 향상을 도모하는 것이다[1]. 뇌임펄스전류등과 같은 이상전류가 인가되었을 경우 그 정도가 심한 경우에는 피뢰시스템의 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 유입되면 빠른 시간영역에서 높은 과도접지임피던스 값을 나타내며 매우 복잡한 특성을 나타낸다[3],[4]. 과도상태에서 인체안전 및 전기설비를 보호하는 접지시스템을 어떻게 하면 효율적으로 설계하여 성능을 향상시킬 수 있는가이다. B. R. Gupta, Leonid Grcev, Jinliang He의 연구에서도 볼 수 있듯이 접지전극의 과도상태에서 유효길이의 특성을 분석하는 연구가 과거부터 현재까지 끊임없이 진행되어 오고 있다[5-8].

본 논문에서는 도심지역과 같이 매설부지가 협소한 경우 또는 표면 대지저항률이 높은 곳에서 주로 사용되는 수직매설 접지전극의 규약접지임피던스를 실증실험장에서 측정한다 [3],[4]. 그리고 모델링을 통하여 임펄스접지임피던스를 이론적으로 해석하였다. 임펄스전류에 의한 토양의 이온화현상은 접지시스템의 성능을 향상키는 요소이나 접지시스템의 안정성을 고려하여 무시하였다[9]. 규약접지임피던스와 임펄스접지임피던스를 비교분석하여 본 연구에서 제안하는 수직매설 접지전극의 유효길이의 결정방법의 타당성을 검증하였다.

## 2 정의

### 2.1 규약접지임피던스 정의

규약접지임피던스는 뇌임펄스전류와 같은 이상전류가 인가되었을 때 발생하는 입력전류의 최대값과 출력전압의 최대값의 비를 말한다. 뇌임펄스전류에 대한 규약접지임피던스의 특성곡선을 그림 1에 나타내고 식 (1)로 정의한다[10].

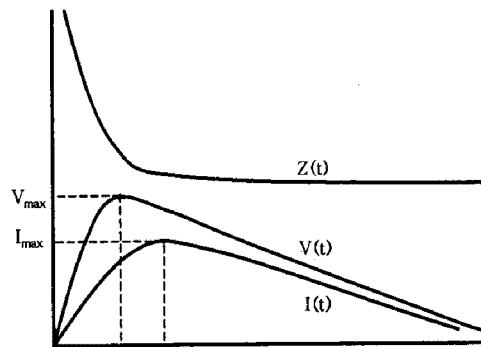


그림 1. 규약접지임피던스 정의  
Fig. 1. Definition of the conventional grounding impedance

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

여기서  $Z$ : 규약접지임피던스,  $I_{max}$ : 입력임펄스전류의 최대값,  $V_{max}$ : 출력임펄스전압의 최대값이다.

### 2.2 임펄스계수의 정의

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

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

여기서,  $A$  : 임펄스계수,  $Z$  : 규약접지임피던스,  $R$  : 접지 저항이다.

### 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 상승시간동안 접지전극의 인가위치에서 부터 접지전극을 이동한 거리로 정의한다[11],[12].

## 3 실측실험 및 결과

### 3.1 실험방법

수직매설 접지전극의 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 도전유도에 의한 오차가 5% 미만인 되는 조건으로 수직매설 접지전극의 규약접지임피던스를 측정하였다. 측정된 수직매설 접지저항은 10 m 수직매설 접지전극, 30 m 수직매설 접지전극이며 지름 0.054m, 매설깊이는 0.7 m 이다.

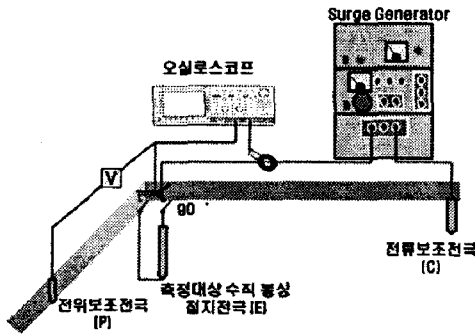


그림 2. 실험계의 구성  
Fig. 2. Configuration of the experimental setup

### 3.2 규약접지임피던스 실측 결과

표 1과 그림 3은 IEEE81.2-1991[13]을 근거로 하여 실측한 10 m, 30 m 수직매설 접지전극의 대지저항률과 규약접지임피던스이다. 임펄스전류의 상승시간에 따라서 10 m 수직매설 접지전극과 30 m 수직매설 접지전극의 규약접지임피던스가 다른 값을 가진다. 이 실험은 규약접지임피던스는 전극의 형상, 대지저항률과 상승시간이 규약접지임피던스에 영향을 미친다는 것을 보여준다.

수직매설 접지전극 길이	대지저항률
10m	87.1 $\Omega \cdot m$
30m	309.63 $\Omega \cdot m$

표 1. 실측을 통하여 산출한 10m 수직매설 접지전극과 30 m 수직매설 접지전극의 대지저항률  
Table 1. Resistivities of the Vertically-driven ground rods

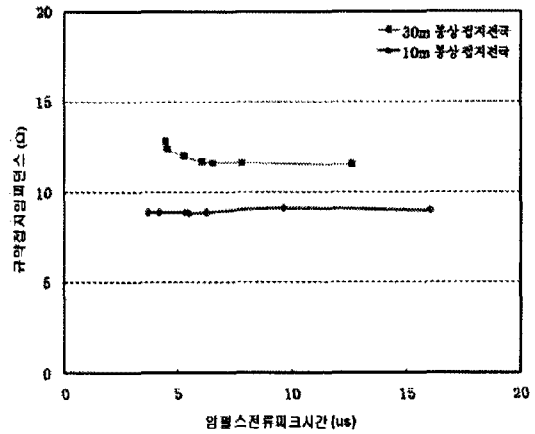


그림 3. 수직매설 접지전극의 임펄스전류상승시간에 따른 규약접지임피던스  
Fig. 3. Conventional Grounding impedances of the deeply-driven rods as a function of the fronted time of impulse current

## 4 모델링 방법

### 4.1 Gupta & Thapar 모델

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

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

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

여기서  $\rho$ : 대지저항률,  $T_1$ : 임펄스전류의 상승시간,  $l$ : 접지전극의 길이이다.

### 4.2 Leonid Grcev 모델

대지저항률과 임펄스의 상승시간을 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 수직매설 접지전극의 길이  $l$ 과 모델링을 통해 산출한 유효길이  $l_{eff}$ 의 길이차이에 따라 임펄스계수를 식 (5)과 식 (6)으로 각각 다르게 적용하여 수직매설 접지전극의 임펄스계수를 산출한다. 또한 임펄스계수 식 (6)과 유효길이 식 (7)에 적용된  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 아래의 식 (8)과 식 (9)을 통하여 산출한다.

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

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

여기서  $\rho$  : 대지저항률,  $T_1$  : 임펄스전류의 상승시간이다.

### 4.3 임펄스접지임피던스

E. D. Sunde 의 수직매설 접지전극의 접지저항을 계산하는 식 (10)을 식 (11)로 이항하여 실측한 접지저항값을 이용하여 대지저항률  $\rho$ 을 구한 후에 임펄스전류의 상승시간  $T_1$ 을 이용하여 임펄스계수를 구한다[14]. 식 (12)을 이용하여 임펄스 접지임피던스  $Z_s$ 을 산출한다.

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} [\ln(\frac{4l}{a}) - 1], (l \gg a) \quad (10)$$

$$\rho = \frac{2\pi R l}{[\ln(\frac{4l}{a}) - 1]}, (l \gg a) \quad (11)$$

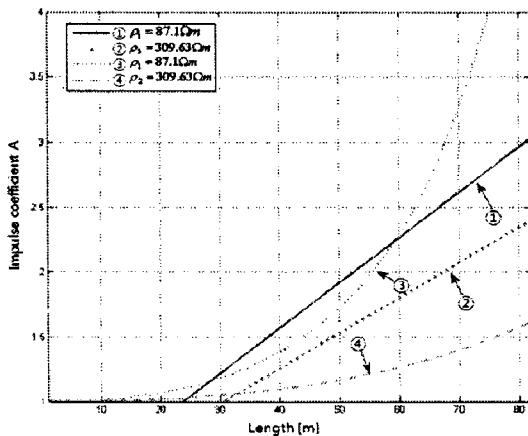
여기서  $R$  : 실측접지전극저항,  $l$  : 접지전극의 길이,  $a$  : 접지전극의 반지름이다.

$$Z_s = R \cdot A \quad (12)$$

여기서  $Z_s$  : 임펄스접지임피던스이다.

### 5. 임펄스계수 모델링 결과

그림 4는 식 (4) 와 식 (5)의 모델을 이용해  $7.5\mu s$ 의 상승시간을 가지는 임펄스전류를 대지저항률  $\rho_1 = 87.1 \Omega \cdot m$  (10 m 수직매설 접지전극), 대지저항률  $\rho_2 = 309.63 \Omega \cdot m$  (30 m 수직매설 접지전극)의 값을 가진 대지에 각각 매설된 수직매설 접지전극에 대한 임펄스계수를 모델링한 결과이다.



①② - Gupta Model / ③④ - Grcev Model  
 그림 4. Leonid Grcev모델과 Gupta & Thapar모델의 임펄스계수 특성 곡선  
 Fig. 4. Comparison between Impulse coefficient characteristics obtained by Gupta & Thapar and Leonid Grcev models

Gupta & Thapar의 임펄스계수 모델은 수직매설 접지전극의 길이가 길어짐에 따라 임펄스계수가 지수함수의 형태로 증가 하는 반면, Leonid Grcev의 임펄스계수 모델은 수직매설 접지전극의 길이가 길어져도 임펄스계수가 직선 형태로 증가 하였다. 따라서 본 논문에서는 유효길이가 길어져도 임펄스계수가 직선 형태로 증가하여 실측한 접지저항의 임펄스계수와 동일한 특성을 나타내는 Leonid Grcev의 임펄스계수 모델을 적용하여 임펄스접지임피던스와 유효거리를 모델링하였다.

### 6. 유효거리 모델링 결과

#### 6.1 $l$ 과 $l_{eff}$ 의 관계

수직매설 접지전극은 실제전극의 길이  $l$  과 유효길이  $l_{eff}$  관계에 따라 3가지로 수직 매설 접지전극의 특성을 구분한다.

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

#### 6.2 10 m 수직매설 접지전극

그림 5는 10 m 수직매설 접지전극이 매설된 대지의 대지저항률  $\rho_1$ 이  $87.1 \Omega \cdot m$  인 경우의 결과이다. 이 결과에서 중요한 것은 모델링에서 수직매설 접지전극과 관련된 요소인 길이, 형상과 매설깊이 등을 고려하지 않고, 대지저항률  $\rho_1$ 과 임펄스전류의 상승시간  $T_1$ 만을 변수로 사용해서 비교를 한다는 것이다. 규약접지임피던스  $Z$ 와 임펄스접지임피던스  $Z_s$ 가 약 3 $\Omega$ 에서 5 $\Omega$ 정도 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 하지만 유효길이가  $l \geq l_{eff}$ 에서  $l \leq l_{eff}$ 로 되었을 때, 임펄스계수  $A$ 를 식 (7)에서 식 (6)으로 변경하여 적용하면 규약접지임피던스와 임펄스접지임피던스가 근사한 특성을 유지한다. 그리고 대지저항률  $\rho_1$ 이  $87.1 \Omega \cdot m$  인 경우에는 규약접지임피던스와 임펄스접지임피던스의 정확한 분석을 위해서 더 빠른 상승시간을 가지는 임펄스전류를 인가하는 실험을 해야 한다는 것을 알 수 있다.

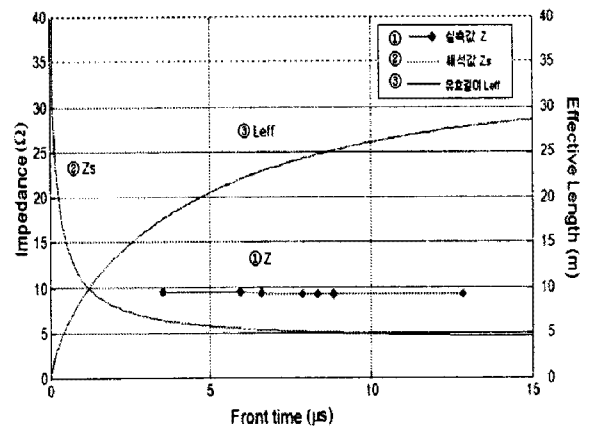


그림 5. 임펄스전류의 상승시간에 따른 임펄스접지임피던스와 유효길이의 특성곡선 (대지저항률  $\rho_1 = 87.1 \Omega \cdot m$ )

Fig. 5 Characteristic curves of modeling conventional grounding impedance and effective length of deeply-driven ground as a function of the fronted time of impulse current. (Resistivity  $\rho_1 = 87.1 \Omega \cdot m$ )

### 6.3 30m 수직매설 접지전극

대지저항률  $\rho_2$  이 309.63  $\Omega \cdot m$  인 대지에 30 m 수직매설 접지전극의 규약접지임피던스와 식 (12)을 이용하여 산출한 임펄스접지임피던스의 비교를 그림 6에 나타내었다. 또한 임펄스전류의 상승시간에 따라 산출한 접지전극의 유효길이도 함께 나타내었다. 전극의 길이, 두께와 매설깊이 등을 고려하지 않았지만 대지저항률  $\rho_2$ 과 임펄스전류의 상승시간  $T_1$ 을 변수로 모델링한 임펄스접지임피던스는 규약접지임피던스와 각각의 상승시간에 대해서 상호 동일한 결과를 보여주고 있다. 이것은 과도상태에서 수직매설 접지전극의 규약접지임피던스의 변화에 가장 큰 영향을 주고 있는 것은 대지저항률  $\rho_2$ 와 임펄스전류의 상승시간  $T_1$ 이라는 것을 증명한다. 수직매설 접지전극의 길이나 모양이 과도상태에서 규약접지임피던스에 많은 영향을 주지 않는다는 것은 여러 연구결과에서도 많이 발표되고 있다[5,6][8][11,12]. 또한 규약접지임피던스의 측정값  $Z$ 과 임펄스접지임피던스의 해석값  $Z_s$ 이 동일하므로 모델링으로 산출한 유효거리 역시 대지저항률  $\rho_2$ 이 309.63  $\Omega \cdot m$  인 대지에서 타당하다고 볼 수 있다.

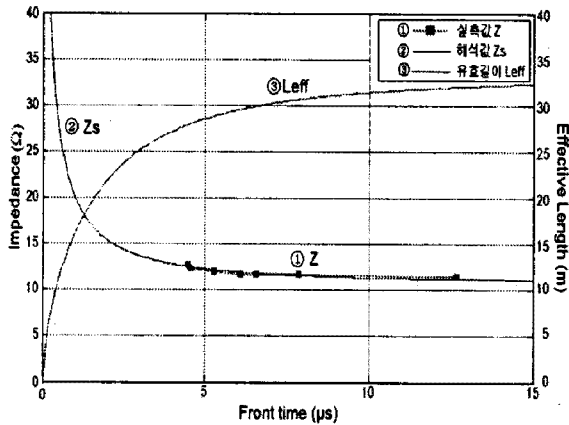


그림 6. 임펄스의 전류피크시간에 따른 수직매설 접지전극의 임펄스접지임피던스와 유효길이의 특성곡선 (대지저항률  $\rho_2 = 309.63 \Omega \cdot m$ )

Fig. 6. Characteristic curves of modeling conventional grounding impedance and effective length of deeply-driven ground as a function of the fronted time of impulse current. (Resistivity  $\rho_2 = 309.63 \Omega \cdot m$ )

## 7. 결론

10 m 수직매설 접지전극이 매설되어 있는 대지저항률  $\rho_1$  이 87.1  $\Omega \cdot m$  인 대지의 경우는 대지저항률  $\rho_2$ 가 309.63  $\Omega \cdot m$  인 대지보다 임펄스전류가 대지로 더 빨리 방출되기 때문에 규약접지임피던스  $Z$  및 임펄스접지임피던스  $Z_s$ 가 낮게 나타났다. 이것은 대지저항률이 낮은 대지의 수직매설 접지전극의 유효거리를 산출하기 위해서는 3.5  $\mu s$  이상의 빠른 상승시간을 가진 임펄스전류를 인가해야함을 보여준다.

30 m 수직매설 접지전극이 매설되어 있는 대지저항률  $\rho_2$  이 309.63  $\Omega \cdot m$  인 경우 실제 측정된 규약접지임피던스  $Z$ 와 해석한 임펄스접지임피던스  $Z_s$ 의 동일한 특성을 나타내는 것

을 확인하였고, 임펄스전류의 상승시간이 5  $\mu s$  이상으로 빠른 경우에도 동일한 특성을 보였다. 이것은 접지전극의 길이, 형상, 매설깊이 등을 고려하지 않아도 규약접지임피던스  $Z$ 와 임펄스접지임피던스  $Z_s$ 가 동일한 특성을 나타내므로 본 논문에서 적용한 유효길이 모델을 통하여 실제 대지구조에서 적용이 가능함을 보여준다. 즉, 과도상태에서 수직매설 접지전극의 유효길이는 대지저항률과 임펄스전류의 상승시간을 이용해서 산출할 수 있다.

그림 4를 보면, 7.5 $\mu s$ 의 상승시간을 가진 임펄스전류에 대해서 대지저항률  $\rho_1$ 이 87.1  $\Omega \cdot m$  인 대지의 경우는 24 m의 유효길이를 가지고, 대지저항률  $\rho_2$ 이 309.63  $\Omega \cdot m$  인 대지의 경우는 30m의 유효길이를 가진다. 이것은  $\rho_1$ 에 매설된 10m 수직매설 접지전극의 경우 7.5 $\mu s$ 의 임펄스전류가 상승시간이 끝나기 전에 접지전극의 길이를 넘어서 이동하는 것을 의미하고, 반면에  $\rho_2$ 에 매설된 수직매설 접지전극의 경우 7.5 $\mu s$ 의 임펄스 전류의 상승시간동안 수직매설 접지전극이 접지전극의 역할을 완전하게 하고 있음을 말한다. 이 결과는 임의의 임펄스전류가 인가되었을 때 수직매설 접지전극의 길이가 유효길이보다 같거나 크게 설계되어야 고유의 접지전극의 역할을 유지할 수 있다는 것을 보여준다.

## 참고 문헌

- [1] 이복희, 이승철, "The Major Foundational Technics for Grounding Systems, 접지의 핵심 기초 기술", 도서출판 의제, pp.4-20, 1999.
- [2] 이복희, 이승철, "Protection of Information and Communication Facilities against Lightning, 정보통신설비의 뇌보호", 인하대학교 출판부, pp.38-46, 2004.
- [3] 엄주홍, "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. Greev, "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] Conos 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. Greev, "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. Greev, "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.