

접지계의 썬어지 임피던스 (Surge Impedance of Grounding Systems)

金 王*
(Wang Kim)

요 약

접지계의 과도응답특성은 전기설비의 절연설계상 매우 중요하며, 이것은 접지전극의 형상과 규모, 대지고유저항 그리고 유입전류의 파형 및 크기 등에 의존한다.

본고에서는 라플라스변환기법을 이용하여 복수접지계의 썬어지임피던스를 도출하는 알고리즘을 제안하고 접지계의 과도특성을 해석하였다.

Abstract

The transient characteristics of grounding systems are very important in the insulation design of electrical installations and depend on the shape and size of electrodes, soil resistivity and the magnitude and wave of the injection current.

This paper establishes an algorithm to compute the surge impedance of two or more grounding systems using the Laplace Transformation technique and deals with the analysis of the transient characteristics on grounding systems.

1. 서 론

뇌전류는 과도순시의 단시간 대전류이고 수십 MHz까지 달하는 고주파이다. 이 전류에 대한 뇌썬어지 접지임피던스는 상용주파의 교류저항치보다 높게되는 경우가 많으며 또한 시간적으로 변화하고 전류유입점, 파형, 접지극의

형상 및 규모, 대지고유저항 그리고 유전을 등에 의해 그 값이 달라지게 된다.^{1), 2)}

이러한 접지임피던스가 높아지면 그 지점의 전위가 상승하여 주변의 약전선이나 연결된 기기의 절연을 파괴하는 경우가 있다.

이와같이 접지계의 과도특성은 절연설계상 매우 중요함에도 불구하고 접지도체 개체에 대한 연구결과는 다수 발표되어 있으나 복수접지계의 합성 썬어지임피던스를 구하는 계산방법은 아직 확립되어있지 않은 실정이다.^{3)~6)}

* 正會員 : 동신대학교 공과대학 정보통신공학과 조교수
接受日字 : 1992年 9月 7日

따라서, 본고에서는 접지계를 구성하는 각 접지극의 써어지임피던스치로부터 합성치를 도출하는 알고리즘을 제안하고 접지계의 써어지 특성을 해석하고자 한다.

2. 접지계의 등가회로와 임펄스응답

2.1 수평 접지전극

그림1은 각 전압 및 주파수대에 대한 접지극의 등가회로를 보인 것인데 뇌격전류는 UHF 대이므로 (c)의 등가회로를 택하여 이상적인 뇌격파형으로서 $i(t) = I_0 \cdot t$ 의 램프입력을 가정하면, 접지도체의 써어지임피던스 $Z(t)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.^{7), 8)}

그림1(c)로부터 다음식이 성립한다.

$$i(t) = i_R + i_C \quad (1)$$

$$\frac{1}{C} \int i_C dt = i_R R \quad \text{또는} \quad i_C = RC \frac{di_R}{dt} \quad (2)$$

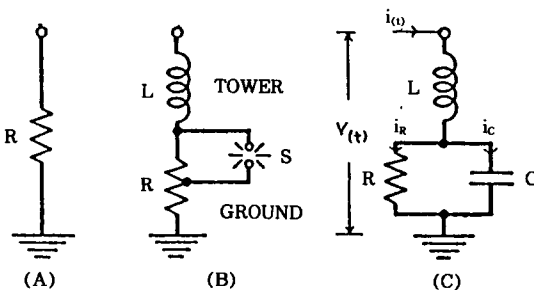
식(1)을 변형한 후 식(2)를 대입하여 라플라스변환하면 식(3)이 된다.

$$I_R = \frac{I(s)}{sRC + 1} = \frac{I(s)}{RC(s + 1/RC)} \quad (3)$$

역시, 그림1(c)로부터 다음 식이 성립한다.

$$v(t) = Ri_R + L \frac{di(t)}{dt} \quad (4)$$

식(4)를 라플라스변환하면 식(5)가 된다.



(A) LOW VOLTAGE, LOW FREQUENCY
(B) HIGH VOLTAGE, HIGH FREQUENCY
(C) ULTRAHIGH FREQUENCY

그림 1 각 전압 및 주파수대의 접지그리드 등가회로
Fig. 1 Equivalent circuits of grounding grid over wide range of voltage and frequency

$$V(s) = RI_R + LsI(s) = I(s) \left[\frac{1}{C(s + 1/RC)} + Ls \right] = I_0 \left[\frac{1}{s^2 C(s + 1/RC)} + \frac{L}{s} \right] \quad (5)$$

식(5)를 라플라스 역변환하여 식(6)을 얻는다.

$$v(t) = I_0 \left[\frac{1}{C \cdot \frac{1}{(R^2 C^2)}} (e^{-t/RC} + \frac{t}{RC} - 1) + L \right] \quad (6)$$

$$\therefore Z(t) = \frac{v(t)}{I_0 \cdot t} = \frac{R^2 C}{t} (e^{-t/RC} - 1) + R + \frac{L}{t} \quad (7)$$

그런데, 임펄스 전류의 Off-Flow에 따른 누설 분($\frac{L}{3}$)을 고려하면 식(7)은 식(8)로 수정되고, 이 식을 이용하여 접지도체의 뇌써어지임피던스를 구할 수 있다.

$$Z(t) = R \left[\frac{RC}{t} (e^{-t/RC} - 1) + 1 + \frac{L}{3Rt} \right] \quad (8)$$

2.2 수직 접지전극

그림2와 같은 접지봉의 저항과 커패시턴스

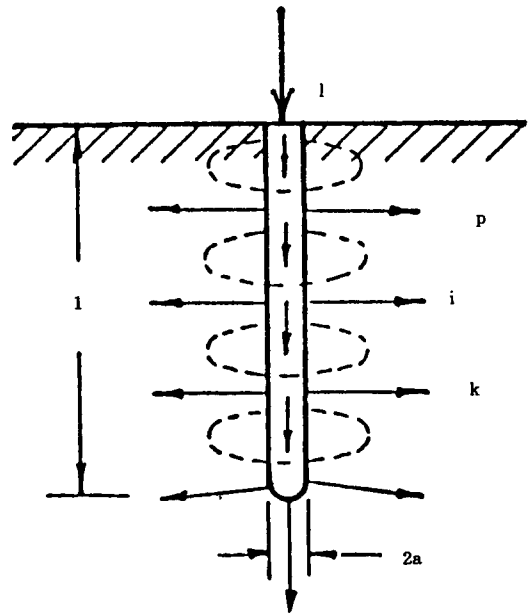


그림 2 접지봉으로부터 방류되는 임펄스전류
Fig. 2 Impulse current spreading from driven rod

및 인덕턴스는 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.^{7), 9)}

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{2l}{a}\right) [\Omega] \quad (9)$$

$$C = \frac{k l}{2 \ln(2l/a)} \cdot \frac{10^{-9}}{9} [F] \quad (10)$$

$$L = 2 l \cdot \ln\left(\frac{2l}{a}\right) \cdot 10^{-7} [H] \quad (11)$$

여기서, ρ 는 대지 고유저항($\Omega\text{-m}$), k 는 비유전율이다.

그러므로 커패시턴스 및 인덕턴스의 시상수 I_c, I_L 은 식(12), (13)으로 주어진다.

$$\tau_c = CR = \frac{\rho k}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \quad (12)$$

$$\tau_L = L/R = 4\pi \frac{l^2}{\rho} \cdot 10^{-7} \quad (13)$$

따라서, 접지봉의 커패시턴스 및 인덕턴스의 시상수는 $10^{-9} \sim 10^{-7}$ [sec]대의 범위로서 뇌격시의 시상수(약 10^{-6} [sec]대)보다 적은 값이므로 뇌임펄스의 시상수에 의존하게 될 것이다.

3. 접지계의 합성 썬어지임피던스

일반적으로 각 접지계 단독의 임피던스 시간 변화는 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$Z_i(t) = Z_{\infty} + (Z_0 - Z_{\infty})e^{-\beta t} \quad (14)$$

여기서, Z_{∞} 는 상용주파접지저항, Z_0 는 초기 썬어지임피던스, β 는 썬어지임피던스 감소시상수이다.

그림3에서와 같이 단위계단함수전류 $U(t)$ 를 인가한 경우의 응답이 각각 $V_M(t), V_P(t)$ 인 접지계를 조합시킨 경우의 합성임피던스는 각 접지계 단독의 계단전류에 대한 과도임피던스를 라플라스변환한 전달함수에 대하여 임피던스 병렬계산을 행한 후, 라플라스 역변환을 취하면 구할 수 있을 것이다. 즉, 접지계가 2개 이상인 경우의 합성썬어지임피던스를 구하는 알고리즘은 다음과 같이 정리할 수 있다.

1) 각 접지계의 상용주파접지저항 $Z_{\infty i}$ 를 구한다.

2) 각 접지계의 초기 썬어지임피던스 Z_{0i} 를

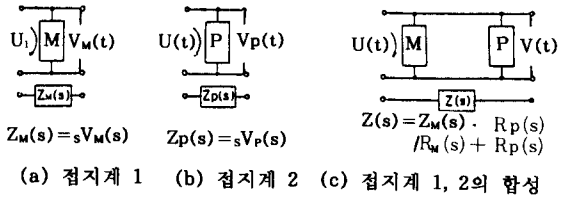


그림 3 접지계의 응답

Fig. 3 Response of grounding system

구한다.

3) 각 접지계의 초기치에서 정상치로 되기까지의 썬어지임피던스 감소시정수 β_i 를 구한다.

4) 각 접지계의 썬어지임피던스 $Z_i(t)$ 를 다음과 같이 근사화한다.

$$Z_i(t) = Z_{\infty i} (Z_{0i} - Z_{\infty i}) e^{-\beta_i t}$$

5) 각 접지계의 썬어지임피던스를 라플라스 변환하여 연산자임피던스 $Z_i(s)$ 를 구한다.

$$Z_i(s) = \frac{sZ_{0i} + \beta_i \cdot Z_{\infty i}}{s(s + \beta_i)}$$

6) 각 접지계의 연산자임피던스의 합성치 $Z(s)$ 를 구한다.

$$Z(s) = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i(s)}$$

이때, 접지계가 2가지인 경우($n=2$)의 $Z(s)$ 는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$Z(s) = \frac{G(s)}{s(s-a)(s-b)}$$

7) $Z(s)$ 를 라플라스역변환하여 접지계의 합성썬어지임피던스 $Z(t)$ 를 구한다.

$$Z(t) = \mathcal{L}^{-1}\{Z(s)\}$$

4. 시뮬레이션 및 고찰

그림4와 같은 수평 및 수직전극에 대한 각각의 썬어지임피던스와 제안한 알고리즘에 의해 산출한 합성썬어지임피던스를 계산한 결과가 표1이다. 그림5는 도체장에 의한 썬어지임피던스를 $Z_{eff} = V_p(T_f : 1[\mu s])/I$ 의 실효임피던스로 나타낸 것이고, 그림6은 접지전극의 길이와 시간의 경과에 다른 썬어지임피던스의 변화를 검토하기 위하여 통상의 접지저항측정법으로 측정된 값으로 규격화한 값의 경과시간에 대한 변화를 보인 것이다.

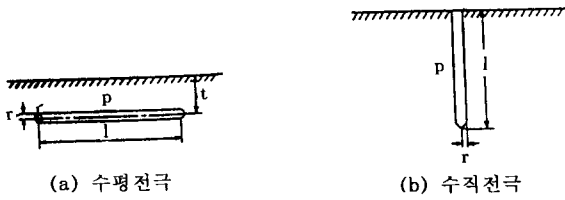


그림 4 접지전극
Fig. 4 Grounding electrodes

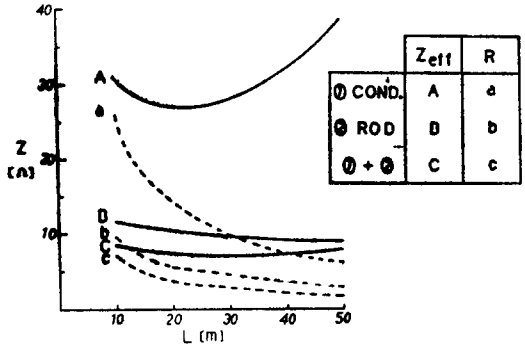


그림 5 합성 접지써어지 임피던스의 저감효과
Fig. 5 Reduction effect of total grounding surge impedance

단, 수평도체는 고유저항이 100(Ω-m)인 대지중에 나연동연선 100(mm²)를 지표면하 60(cm)의 깊이에 매설한 것으로 가정하였으며 수직도체의 써어지임피던스는 실측자료¹⁾로부터 귀납적인 방법으로 추출하여 적용하였다.

표1 및 그림5에서 각 접지전극의 초기 써어지임피던스는 정상저항치에 비해서 수배~수십배로 매우 높게 나타났는데 이것은 접지점으로부터 써어지전류가 진행과로서 유입하고 접지체의 말단에 도달하여 반사된 성분이 원래의 접지점에 돌아올때까지의 시간지연에 기인한 것이다. 또한, 수직도체는 심타하면 정상저항치는 저감하지만 써어지임피던스의 초기치는 50~55(Ω)으로 거의 동일하였으며, 심타할수록 과도임피던스가 정상치로 감소되기까지의 시간이 지연되므로 50(m)의 심타를 하는 것보다 접지계의 여건에 따라 10(m)의 수직봉을 수분병렬로 타입하는 대체방안도 함께 검토되어야 할 것이다. 역시 표1과 그림5로부터 수평 및 수직도체의 합성써어지임피던스는 각 접지계

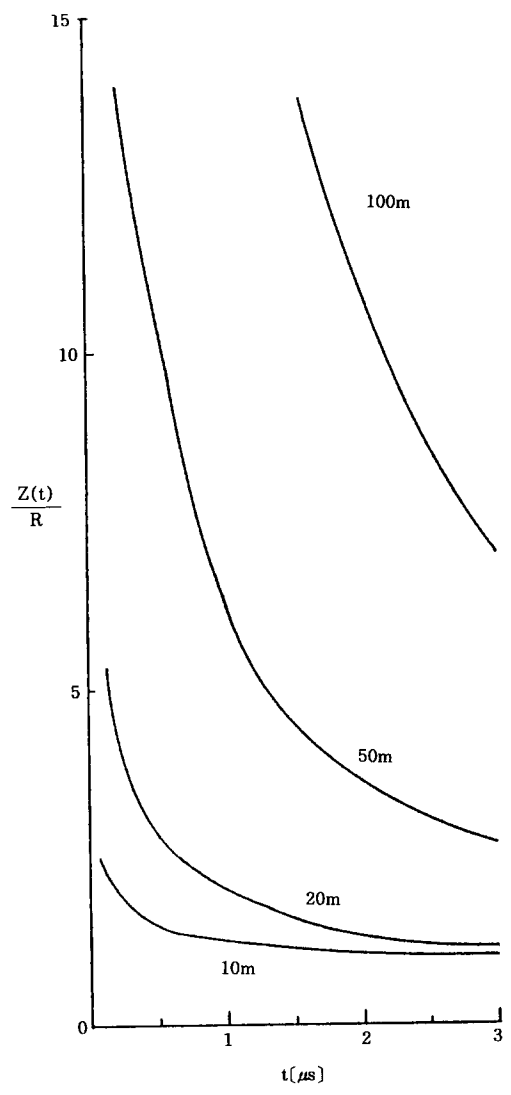


그림 6 접지도체장에 따른 써어지임피던스의 변화
Fig. 6 Change of surge impedance for grounding wire's lengths

단독의 써어지임피던스보다 현저히 저감됨을 알 수 있는데, 초기치와 정상치의 저감효과는 각각 1/2~1/4, 1/1.4~1/3.7로 나타났다.

한편 그림6은 뇌격전류와 같은 급준파두 써어지의 경우에는 접지도체가 길어지면 그 길이의 영향이 지배적으로 되고 접지저항치에는 그다지 의존하지 않음을 보이고 있다.

표 1 접지계의 썬어지임피던스
Table 1 Surge impedance of grounding systems

Z[t] t[μs] l[m]	수 평 도 체						수 직 도 체		합 성 치	
	0.2	0.5	1.2	2.0	3.0	∞	0.2	∞	0.2	∞
10	52.26	36.50	30.37	28.50	27.75	26.0	50	9.6	25.55	7.01
20	72.59	37.53	23.76	19.96	18.0	14.1	52	5.3	30.30	3.85
50	168.93	71.37	33.15	22.49	17.06	6.2	55	2.9	41.49	1.98

5. 결 론

최근 전력설비의 대용량화, 변전시설의 축소화라는 상반된 여건하에서 여하히 접지계의 과도특성을 정확히 예측하여 안전하고 경제적인 접지설계를 유도하느냐 하는 것은 결코 쉽지 않은 난제이긴하나, 본고에서 제안한 썬어지임피던스 합성알고리즘을 이용하면 복수개로 구성되는 접지계의 과도특성에 대한 근사적인 해석이 가능할 것이다.

본고의 주요 연구성과 및 해석결과는 다음과 같이 정리될 수 있다.

- 1) 복수개로 구성되는 접지계의 합성썬어지 임피던스를 도출하는 알고리즘을 제안, 실용화 하였다.
 - 2) 뇌격전류와 같은 급준파두 썬어지의 경우, 접지도체장이 길어지면 그 길이의 영향이 지배적으로 되고 접지저항치에는 그다지 의존하지 않았다.
 - 3) 수직접지전극의 경우, 심타하면 정상저항치는 저감하지만 썬어지임피던스의 초기치는 50~55[Ω]으로 거의 동일하게 나타났다.
 - 4) 합성썬어지임피던스는 접지전극 단독의 썬어지임피던스보다 최대 75(%), 최소 29(%)의 현저한 저감효과가 있었다.
- 끝으로, 수평·수직접지도체의 상호임피던스

는 두 접지극을 90°로 연결하는 일반적인 경우에는 $Z_m=0$ 으로 볼 수 있을 것이나, 종류가 다른 전극을 병용한 경우, 접지임피던스는 각각의 전극의 영향을 미소하나마 받게 되므로 보다 정밀한 해를 구하기 위해서는 상호임피던스의 영향도 고려할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- 1) 稿本信雄, 雷ヒサージ, 電氣書院, 1991, pp.84~114.
- 2) 岡重信, 中原堅司, 口武光, “各種避雷設備의 適用法”, OHM, 오름社, pp.22~29, 1984. 6.
- 3) B.R.Gupta B. Thapar, “Impulse impedance of grounding grids”, IEEE Trans. Vol.PAS-99, No.6, pp.2357~2362, 1980.
- 4) A.P.Meliopoulos, M.G.Moharam, “Transient analysis of grounding systems”, IEEE Trans. Vol. PAS-102, No.2, pp.389~398, 1983.
- 5) 樋口武光, “雷サージ의 接地系 傳播狀況”, EMCJ 89-98, pp.61~68, 1989.
- 6) W.A.Chisholm, W.Janischewskyj, “Lightning surge response of grounding electrodes”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4, No.2, pp.1,329~1,337, 1989.
- 7) IEEE Substation Comittee, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, ANSI/IEEE Std 80-1986, pp.241~284.
- 8) R.Verma, D.Mukhedkar, “Fundamental considerations and impulse impedance of grounding grids”, IEEE Trans. Vol. PAS-100, No.3, pp.1,023~1,030, 1981.
- 9) 高稿健彦, 接地技術入門, 오름社, 1990, pp.35~99.