뇌써지에 의한 과도 대지전위상승 특성 분석

이재복, 명성호, 장석훈 조연규, 김점식*, 길경석*
한국전기연구원, *한국해양대학교

TGPR Characteristic Analysis for Lightning Surge

J.B.Lee, S.H.Myung, S.H.Chang, Y.G.Cho, J.S.Kim*, G.S.Kil*
Korea Electrotechnology Research Institute, *Korea Maritime University

Abstract - Transient GPR characteristics of two different grounding systems were measured in this paper. The scale model method was used to analyze the effectiveness of bonding two grounding grids systems. Also the measured results were verified by comparing with Pspice analysis results.

1. 서 론

낙뢰나 개폐 써지에 의해 발생되는 과도전류에 의한 접지계의 과도접지 해석은 기존의 전력회로의 고장전류에 의한 정상상태 해석문제와는 달리 과도전류의 주파수가 광대역의 스펙트럼을 나타내고 있고, 대전류에 대한 토양의 이온화 현상과 더불어 국부적인 아크가 발생하기 때문에 매우 심한 비선형 특성을 나타내기 때문에 계산 알고리즘이 매우 복잡하며, 실측결과와 유사성을 발견하기 힘들다.

지금까지는 관련 연구는 접지계를 과도전류원에 의한 방사 안테나로 모의하고 여기서 방사되는 전자계가 임의의 점 혹은 접지계의 한 점에 시영역에서 어떤 양상으로 나타나는지를 분석하는 문제였다.[1,2,3] 이를 위해서는 특정주파수에서 접지계의 미소분할 길이요소에 의한 방사 전자계를 계산하고 이를 중첩의 정리를 이용하여 전체 접지계에 합하여 이른바 적분방정식을 해를 구하는 방식을 사용하고 있다.[4,5] 이와 같이 구해진 주파수 영역에서 구해진 계산된 전자계를 역 푸리에 변환을 하여 임의의 공간의 시영역의 과도 전압파형을 구하게 된다.

이와 같은 전자계 해석방식은 알고리즘이 매우 복잡하지만 접지계의 접지 전극면 이외의 지표면의 과도전위상승(Transient Ground Potential Rise : TGPR)를 계산할 수 있다. 전송선 이론을 이용한 TGPR 계산 방식은 전극을 전송선과 같이 모의하여 계산하는 회로이론 방식으로 접지 전극면에서만 TGPR이 계산 가능하다. 본 논문에서는 회로이론 계산 방식을 사용하여 독립된 2개의 접지계에 등전위 본딩효과를 해석하였으며, 이를 축소모의 접지계를 이용하여 검증하였다.

2. 본 론

2.1 해석이론

그림 1과 같이 길이가 긴 수평 매설 접지극은 단위 길이당 정수를 R, L, G, C라 할 때 임의의 점 x 지점의 전압과 전류를 라플라스 연산자를 사용하여 나타내면 식 (1)이 성립한다.

$$\frac{\partial V(x)}{\partial x} = -(R+Ls)I(x) \quad (1)$$

$$\frac{\partial I(x)}{\partial x} = -(G+Cs)V(x) \quad (2)$$

식 (1)을 x에 대해 미분하면

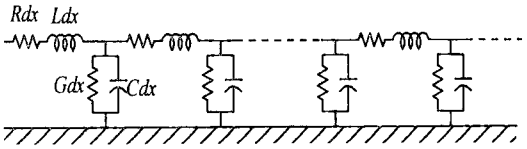


그림 1. 수평매설도체의 등가회로
Fig. 1 Equivalent circuit of buried horizontal grounding conductor

$$\frac{\partial^2 V(x)}{\partial x^2} = -(R+Ls)(G+Cs)V(x) \quad (3)$$

이 되며, 그 해는

$$V(x) = V(0)e^{\sqrt{(R+Ls)(G+Cs)}x} \quad (4)$$

식(4)를 x에 대해 미분하면 식(1)과 같으므로 V(0)가 구해지며 임의 지점 x의 전위 $V(x)$는

$$V(x) = Z_0\sqrt{\frac{s+b_0}{s+b_1}}\,I(x) \quad (5)$$

단, $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$, $b_0 = \frac{R}{L}$, $b_1 = \frac{G}{C}$

단위계단 전류입력에 대해

$$V(0) = Z_0\frac{1}{s}\sqrt{\frac{s+b_0}{s+b_1}} \quad (6)$$

따라서 전압은

$$V(x) = Z_0\frac{1}{s}\sqrt{\frac{s+b_0}{s+b_1}}\,e^{-\frac{x}{v}\sqrt{(s+b_0)(s+b_1)}} \quad (7)$$

단, $v = \sqrt{\frac{1}{LC}}$

수평매설도체의 내부임피던스 R은 무시가능 하므로 식 (7)은

$$V(x) = Z_0\sqrt{\frac{1}{s+b_1}}\,e^{-\frac{x}{v}\sqrt{s(s+b_1)}} \quad (8)$$

따라서 식 (8)에 역 라플라스 변환을 취하면

$v(x,t) = 0$, $0 < t < \frac{x}{v}$ 일때

$$v(x,t) = Z_0 e^{-0.5b_1 t} I_0\left(0.5b_1\sqrt{t^2 - \frac{x^2}{v^2}}\right),\ t > \frac{x}{v} \text{ 일 때} \quad (9)$$

단, I_0는 영차 1종 수정형 Bessel 함수

대지 누설성분인 R,L,G,C는 Sunde씨의 자료에 의하면, 길이 l, 반경 a, 매설깊이 d_c라 하면

$$R = 0.5\frac{\sqrt{s}}{\pi a_c}\sqrt{\frac{\mu_0}{\sigma_c}} \quad (10\text{-}1)$$

$$L = 2\times 10^{-7} f_0 \quad (10\text{-}2)$$

$$G = \frac{\pi}{\rho_g f_0} \quad (10\text{-}3)$$

$$C = \frac{(e_r+1)10^{-9}}{36 f_0} \quad (10\text{-}4)$$

$$f_0 = \log \frac{2l}{\sqrt{2a_c d_c}} - 1 \qquad (10\text{-}5)$$

로 식(9)에서 x=0인 지점에서 단위 계단함수 전류를 주입하면 그림 2와 같이 수평매설도체의 전위 와 임피던스는 대지저항률에 비례하고 유전율에 반비례하는 특성을 나타낸다.

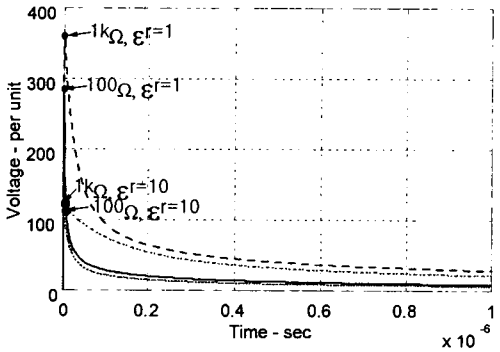


그림 2. 수평매설도체의 단위계단전류에 대한 응답특성
($x=0$에서 $l=100m$, $a=2cm$, $d_c=1m$)
Fig 2. Transient voltage along a buried horizontal grounding conductor for unit step current.

이와 같은 과도 임피던스의 양상은 임의의 전류파형에 따라 그림 3과 같이 다른 양상을 나타내며, 이는 Duhamel의 적분원리에 의해 구할 수 있다.

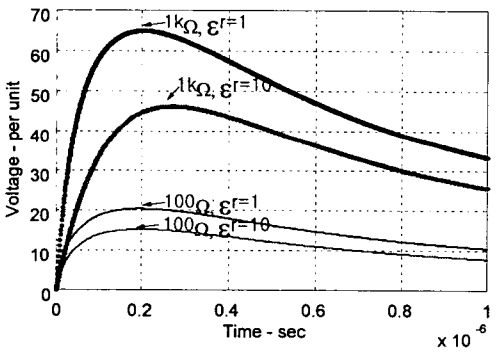


그림 3. 수평매설도체의 1.2/50㎲ 입력전류에 대한 응답특성
($x=0$에서 $l=100m$, $a=2cm$, $d_c=1m$)
Fig 3. Transient voltage along a buried horizontal grounding conductor for unit 1.2/50㎲ current.

이와 같이 수평매설도체에 적용된 회로이론은 망 접지계에 확장하여 적용할 수 있다. 망 접지계에 본 전송선 이론을 적용하기 위해서는 망의 격자 한 면을 R,L,G,C의 집중정수회로로 모의하여 이들 요소 1개로 구성된 망접지계를 형성함으로써 가능하다. 이를 PSpice와 같은 회로해석 프로그램을 이용하면 아날로그 회로해석이 가능하다.

2.2 축소 접지모의 시스템의 구성

균등한 대지면에 매설된 접지계를 모의하기 위해 직경 2 m의 반구형 수조탱크를 이용하여 축소접지모의 시스템을 구성하였다. 접지모의시스템에 과도전류를 인가하기 위한 전원은 그림 4와 같은 내부임피던스가 2Ω인 조합파 뇌써지 발생장치(1.2/50㎲개방회로전압, 8/20 ㎲ 단락회로전류 발생)를 이용하였다. 측정점의 이동 및 계측을 위한 제어계측장치, 반구형 수조탱크, 시험접지계로 이루어진다.

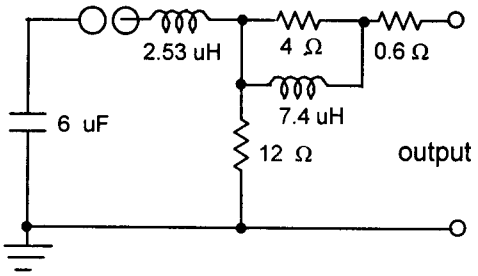


그림 4. 뇌써지 발생장치의 등가회로
Fig 4. Equivalent circuit of Combination lightning surge generator

그림 5에 접지모의 시스템의 구성도를 나타내었다. 저항률 39.1Ω-m의 지하수로 대지를 모의하였다. 시험접지계는 표 1과 같이 제원의 전원 접지계와 신호 접지계를 100:1의 비율로 축소 모의하였다. 적용된 전원 접지계와 신호 접지계는 각각 0.32 x 0.32 m, 0.16 x 0.16 m의 망상 전극구조(그리드 간격 0.04m)로 표면에서 5mm 깊이에 설치하였다. 여기서 접지도체의 반경은 제조상 문제로 10:1 축척을 이용하였다. 표면전위 측정용 프로브는 1000:1(Tektronix P6015A)로 측정하였으며, 인가 전압 및 전류는 써지발생장치의 전압/전류 모니터 단자로부터 측정하였다. 그림 6에 구성된 축소 접지모의시스템을 나타내었다.

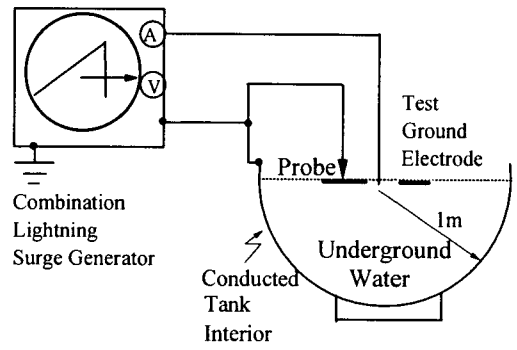


그림 5. 접지 모의 시스템의 구성도
Fig. 5. Schematic diagram of scale model grounding simulation system

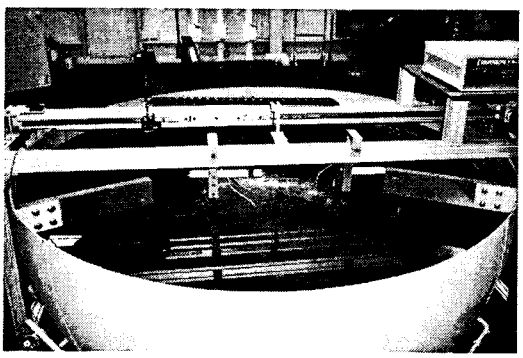


그림 6. 축소 접지 모의 시스템
Fig. 6. Scale model grounding simulation system

표 1. 다중 접지계의 파라미터
Table 1. Parameters of multi-grounding system

접지계	grid size	간격	접지도체 반경	매설깊이
전원접지계	32m x 32m	4m	5.25mm	0.5m
통신접지계	16m x 16m	4m	5.25mm	0.5m

2.3 접지계의 과도 전위상승 분포

모의된 접지계를 그림 7에 나타내었으며 전원 접지전극의 중심에 10 kV을 인가하고 두 접지계의 분리 및 접속시의 전위상승의 계산하였으며 모의 접지계에서 측정한 결과와 비교하였다.

두 접지계의 분리시의 상호 임피던스는 두 접지계에 상기의 전압을 인가한 후 전압/전류파형을 측정하여 이들의 비인 124.5 Ω을 저항으로 모의하였다. 써지 인가 리드선의 인덕턴스와 저항은 각각 0.1 mΩ, 8.55 μH로 LCR 메타로 측정하여 구했다.

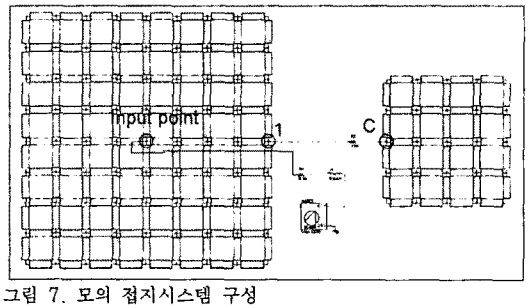


그림 7. 모의 접지시스템 구성
Fig.7. Configuration of simulated grounding system

상호 분리 및 접속시의 C점의 TGPR 해석결과는 그림 8과 같이 각각 1.6 kV, 9.4 kV로 접속시의 C 점의 전위는 인가전위와 비슷하게 등전위를 이룸을 알 수 있다. 실험결과에서도 이와 같은 양상을 나타내며, 그 결과는 그림 9와 같다. 또한 두 접지계의 접속시에는 등가 임피던스가 작아지기 때문에 인가전류는 커지게 된다.

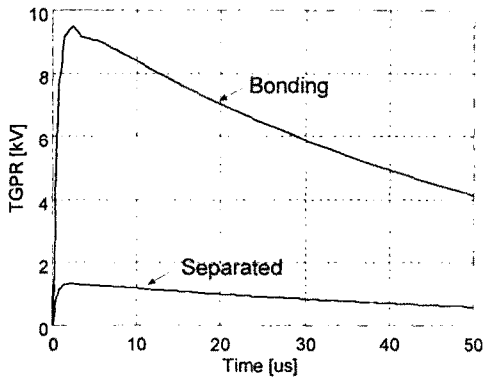
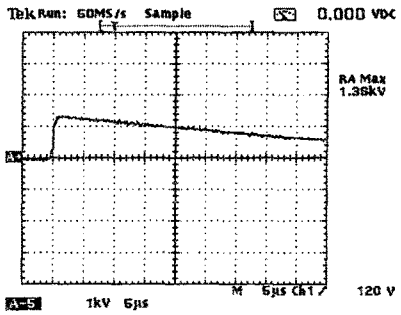
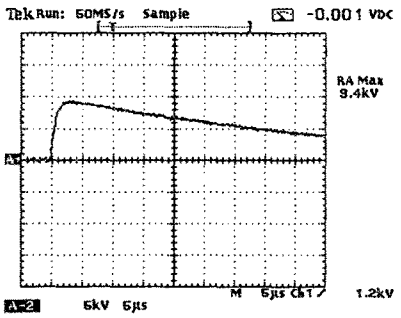


그림 8. 두 접지계의 분리시와 접속시의 C점의 TGPR 계산 결과
Fig. 8. Calculated TGPR of the C point for separated and bonding of grounding system



(a) 분리시



(b) 접속시

그림 9. 두 접지계의 분리시와 접속시의 C점의 TGPR 측정 결과
Fig. 9. Measured TGPR of the C point for separated and bonding of grounding system

3. 결 론

망상형 두 계의 접지계에 대한 과도대지전위상승을 회로이론 계산 방식을 사용하여 2개의 접지계에 대한 등전위 본딩효과를 해석하였으며, 이를 축소 모의 접지계를 이용하여 검증하였다. 그 결과 전원접지계와 통신접지계를 상호 연결한 경우 두 접지계에 등전위를 나타남을 확인할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] R. Velazquez, D. Mukhedkar "Analytical Modelling of Grounding Electrodes Transient Behavior", IEEE Transactions on Power Apparatus System, Vol. PAS-103, No.6, pp.1314~1322, June, 1984

[2] Farid Dawalibi, Alan Selby, "Electromagnetic Fields of Energized Conductors", IEEE Trans PWRD, SM 456-4, pp.1~8, 1992

[3] Leonid. D. Grcev, Markus Heimbach, "Frequency Dependent and Transient Characteristics of Substation Grounding System", IEEE Trans PWRD, SM 390-5, pp.1~6, 1996

[4] Markus Heimbach, Leonid. D. Grcev, "Grounding System Analysis in Transient Programs Applying Electromagnetic Field Approach", IEEE Trans PWRD, SM 392-1, pp.1~8, 1996

[5] Markus Heimbach, Leonid. D. Grcev, "Simulation of Grounding Structures within EMTP", ISH'97 10th International Symposium on High Voltage Engineering, pp.131~135, Aug. 1997