

배전선로의 유도뢰 해석

김헌준* 최상열 정호성 신명철
성균관대

박남옥
한국전기연구소

Analysis on Overvoltage induced on Power Distribution line by Lightning surge

Kim H.J* Choi S.Y Jung H.S Shin M.C
Sung Kyun Kwan Univ.

Park N.O
KERI

Abstract -This paper present overvoltage induced on distribution power line by lightning surge. It is important problem that overvoltage threatens credit and security of the power system. In this paper induced overvoltage was calculated. From the line being modeled in really actual practice. Also, the proper suppressing effects of a surge arrester against lightning induced voltages were suggested.

1. 서 론

양질의 전력을 공급하기 위해서는 수용가와 직결되는 배전계통의 전력설비가 사고로부터 신뢰성과 안전성을 갖는 것이 중요하게 되었다. 배전계통의 사고를 살펴보면 뇌방전현상에 의한 사고가 많은 부분을 차지하고 있다. 따라서 배전계통의 신뢰성 향상을 위해서는 뇌 피해방지가 중요하다. 배전선로에서는 뇌피해중에서도 유도뢰에 의한 사고가 대부분을 차지하고 있다. 직격되는 수반되는 에너지의 양도를 뿐만 아니라 발생하는 과전압도 수백~수천[KV]에까지 이르기 때문에 이에 대한 절연대책을 세우는 것은 불가능하다고 할수 있다. 따라서 발생하는 전압은 비교적 낮지만 빈도가 많은 유도뢰가 배전선로에 절연설계에 기준이 되고 있다. 그래서 많은 논문들이 유도뢰에 의해서 배전선로에 유기되는 유도뢰 전압에 대해 해석하고 적절한 대외대책을 제시하고 있다. 그런데 이러한 유도뢰전압 해석을 정확히 하기 위해서는 이론적 수식의 전개 못지않게 배전선로를 얼마나 실제에 가깝게 시뮬레이션 하느냐 하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 우리나라 배전선로와 실제로 가깝게 선로 모델을 세우고 또한 실제로 사용되고 있는 피뢰기 특성을 그대로 대입해서 유도뢰 전압 해석을 하고자 한다.

2. 본 론

2.1 유도뢰 전압식

일반적으로 선로에 유도되는 전압(U)은 아래의 식(2.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U = - \int_0^{z=h} E_z \cdot dz \quad (2.1)$$

E_z : z 방향 (수직방향) 의 전계
h : 선로 높이

선로 방향전류는 수직 방향의 vector potential 성분에 기여하지 않으므로 수직 방향의 전계성분 E_z 는

(1) 주방전전류에 의해 유도전계 E_z 의 z방향 성분

(2) 선로에 유기된 전하에 의한 전계 E_c 의 z방향 성분
의 합이 되고 유도뢰전압(U)은 (2.2)식으로 다시 표시되어진다.

$$U = - \left(\int_0^{z=h} |E_z|_z dz \right) + [K](q) \quad (2.2)$$

여기서,

$$E_z = - \text{grad } V_i - \frac{\partial A_i}{\partial t} \quad (2.3)$$

(A_i : 기유도 벡터 포텐셜, K : 전위 계수)

V_i : 기유도 스칼라 포텐셜

$$K_{\mu\nu} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_\mu}{r_\mu} \quad K'_{\mu\nu} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d_{\mu\nu}'}{d_{\mu\nu}}$$

h_μ : 도체 μ 의 지상으로부터 높이

r_μ : 도체 μ 의 반경

$d_{\mu\nu}$: 도체 μ 와 ν 의 거리 = $\sqrt{r_{\mu\nu}^2 + (h_\mu - h_\nu)^2}$

$d_{\mu\nu}'$: 도체 μ 와 도체 ν 의 허상과의 거리

$$= \sqrt{r_{\mu\nu}^2 + (h_\mu + h_\nu)^2}$$

$$\epsilon_0 : \text{진공의 유전율} = \frac{10^{-7}}{4\pi v^2}$$

$$= 8.8542 \times 10^{-12} \text{ (F/m)}$$

$$v_0 : \text{전자파의 진행속도} = 3 \times 10^8 \text{ (m/s)}$$

$$q : \text{도체 단위길이당 전하량 (coulomb/m)}$$

유도전압(U)을 유도 스칼라포텐셜(V)을 써서 다시 나타낼 수 있다. 유도 스칼라포텐셜은 주방전전류에 의해 증가한 뇌도상의 전하와 도체상에 유기되는 전하에 의해 일어나는 것 둘의 합으로 표시되고 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{22} \\ V_{33} \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dots & \dots \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \dots & \dots \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

여기서,

$V_1, V_2, V_3 \dots$: 유도 스칼라포텐셜

$q_1, q_2, q_3 \dots$: 배전선 단위 길이당의 전하량 (C/m)

(2.2)식과 (2.3)식과 (2.4)식에 의해 유도뢰전압(U)은 다음과 같다.

$$U = \int_0^{z=h} \left[\text{grad } V_i + \frac{\partial A_i}{\partial t} \right]_z dz + \frac{[k]}{[k]} \cdot (V - V_i)$$

$$\int_0^{z=h} | \text{grad } V_i |_z dz = V_i \quad \text{이므로,}$$

구하려는 유도뢰 전압은 최종적으로 다음과 같이 표시된다.

$$U = V + h \left(\frac{\partial A_i}{\partial t} \right)_z \quad (2.5)$$

위식을 유도되 스칼라포텐셜 성분에 의한 전압부분 V와 유도되 벡터포텐셜 성분에 의한 전압부분 V_A 로 다시 나타낼 수 있다.

$$U = V + V_A \quad (2.6)$$

2.2 유도되에 대한 선로 방정식

선로방향의 전계는 전자계의 일반식으로부터 다음과 같이 표시된다.

$$E_i = - \text{grad } V_i - \frac{\partial A_i}{\partial t} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} E_{x1} \\ E_{x2} \\ E_{x3} \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial V_1}{\partial x} \\ \frac{\partial V_2}{\partial x} \\ \frac{\partial V_3}{\partial x} \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & \dots & \dots \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & \dots & \dots \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial I_1}{\partial t} \\ \frac{\partial I_2}{\partial t} \\ \frac{\partial I_3}{\partial t} \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}$$

선로방향의 전계가 0이므로 E_x 성분이 없어지게 된다. 따라서 다음식이 주어진다

$$\left(- \frac{\partial V}{\partial x} \right) = [L] \cdot \left(\frac{\partial I}{\partial t} \right) \quad (2.8)$$

또, 선로의 전류의 증분에 의해서 다음식이 유도된다.

$$\left(- \frac{\partial I}{\partial x} \right) = C \cdot \left(\frac{\partial (V - V_i)}{\partial t} \right) \quad (2.9)$$

여기서,

$$C_{\mu\nu} = (-1)^{\mu\nu} \cdot \frac{\mu \text{ 행 } \nu \text{ 열에 관한 } D \text{ 의 소행렬식}}{D}$$

$$D = \begin{vmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1m} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{m1} & k_{m2} & \dots & k_{mm} \end{vmatrix}$$

결국, 유도되 전압을 구하기 위해서는 아래식의 V_i 와 V_A 를 구함으로써 알 수 있다.

$$U = V + V_A \quad (2.10)$$

$$\left(- \frac{\partial V}{\partial x} \right) = [L] \cdot \left(\frac{\partial I}{\partial t} \right) \quad (2.11)$$

$$\left(- \frac{\partial I}{\partial x} \right) = C \cdot \left(\frac{\partial (V - V_i)}{\partial t} \right) \quad (2.12)$$

2.3 선로의 유도되 해석

선로의 유도되 전압을 해석하는데 크게 일반구간과 변이점구간 둘로 나누었다. 변이점구간이란 선로의 말단, 피뢰기 설치지점, 가공지선의 접지점과 같이 일반구간과는 다른 점을 취급한 구간을 말한다.

2.4 피뢰기의 특성

아래의 피뢰기의 전압, 전류특성은 실제 사용되고 있는 배전 선로용 Gapless 피뢰기의 특성을 나타낸 것이다.

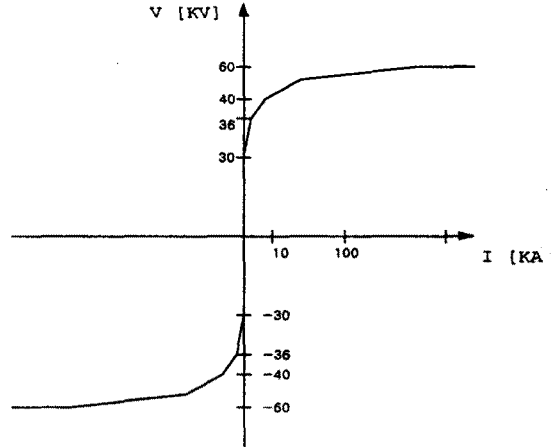


그림 1. 피뢰기 전압 전류특성곡선

$I < -1000$	$V = 1.66 I - 43340$
$-1000 \leq I < -100$	$V = 5.55 I - 39445$
$-100 \leq I < -10$	$V = 44.4 I - 35556$
$-10 \leq I < -0.001$	$V = 600 I - 30000$
$-0.001 \leq I < 0.001$	$V = 3 \times 10 I$
$0.001 \leq I < 10$	$V = 600 I + 30000$
$10 \leq I < 100$	$V = 44.4 I + 35556$
$100 \leq I < 1000$	$V = 5.55 I + 39445$
$1000 \leq I < 10000$	$V = 1.66 I + 43340$
$10000 \leq I$	$V = 59940$

2.5 수치 해석 알고리즘 흐름도

본 논문에서 제시한 유도되 전압 수치해석 알고리즘의 전체적인 흐름도는 그림 2과 같다. 먼저 수치해석 알고리즘은 다음과 같다. 먼저 입력으로부터 선로의 높이, 선로의 수, 선로의 반지름, 선로 사이의 거리등을 입력 받아서 데이터를 처리하여 선로 정수를 계산하고, 모의 뇌격파형 전류의 중첩적분으로 구해진 V_i 와 V_A 를 계산한다. 구해진 전압은 선로의 조건에 따라 다른해석에 의해 유도되 전압의 크기를 구할 수 있다.

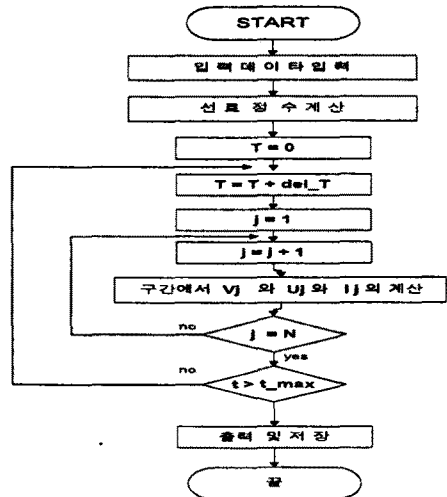


그림 2. 수치해석 알고리즘 흐름도

2.6 시뮬레이션 및 결과

선로의 길이는 2400(m)로 피뢰기의 설치시 설치간격은 변화를 주어 시뮬레이션하여 보았다. 뇌격지점은 선로에서 100(m) 떨어진 지점이다. 뇌격전류는 최대치가 100(KA)정도라고 가정하였다. 시뮬레이션은 3가지 경우로 나누어 하였다. 첫번째 선로에 가공지선이나 피뢰기가 전혀 설치되지 않았을 경우, 둘째, 가공지선만 설치되어 있는 경우, 셋째 가공지선과 피뢰기가 모두 설치되어 있는 경우, 이 세가지경우로 시뮬레이션 하였을 때의 선로에 유기되는 유도전압의 파형은 아래와 같다.

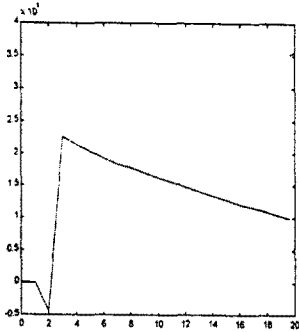


그림 3. 가공지선과 피뢰기가 모두 설치 안된 경우

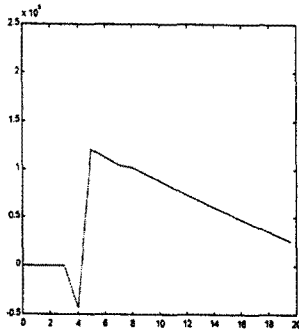


그림 4. 가공지선만 설치된 경우

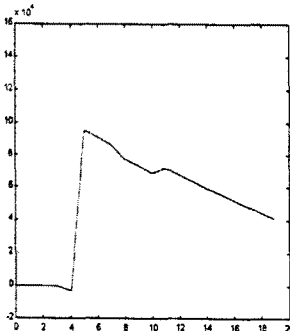


그림 5. 가공지선과 피뢰기가 모두 설치된 경우

3. 결 론

본 논문은 직격뢰보다 발생빈도가 높은 유도뢰가 발생하였을 때 가까운 선로에 발생하는 이상전압을 해석하는 기법에 관하여 소개하였다. 선로에서 떨어진 지점에 낙뢰가 발생했을 때 정전유도와 전자유도에 의해 발생된 전압과 전류를 해석하는 프로그램을 통해 이상전압을 해석하였다 보통 우리 계통의 전력설비가 125~150(KV) 정도의 절연내력을 가지므로 가공지선으로만 보호하는 것보다는 적절히 피뢰기를 설치하여 보호하는 것이 배전 계통의 전력설비가 사고로부터 신뢰성과 안정성을 가지고 양질의 전력을 공급하는데 기여할 것으로 기대된다.

(참 고 문 헌)

1. 配電線 誘導雷 現象의 解析과 實證 -電力中央研究所-
2. Vernon Cooray, "Calculating Lightning-induced Overvoltages in Power lines: A Comparison of Two Coupling Models", IEEE Transaction On Electromagnetic Compatobilty, VOL.36, NO. 3 August 1994
3. J.P.Bickford, B.Sc.,M.Sc., "Dynamic model of a surge arrester for computercalculation of lightningperform of substations", IEEE Proceedings, Vol .131 ,Pt. c, No 7, November 1984
4. Huixin Hu, Matthew s. Mashikian "Modeling of Lightning surge protection in branched Cable distribution network", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.5, No. 2, April 1990
5. A.J.Eriksson ,M.F.strogfellow, D.V. Meal " Lightning induced overvoltages on overhead distribution lines ", IEEE Trans. on Power Apparatus and systems, Vol PAS101, NO. 4, April 1982
6. Roger c. Dugan, " Conduction of lightning stroke currents from the Utility System to load devices.", IEEE Proceeding Power Quality, Oct. 1988