

전력선하의 전자계

강대하, 이재훈, 이영식, 최필수
부경대, 전기안전공사, 부일인스텍

Electromagnetic Fields under Electric Power Lines

DAE-Ha Kang, Jae-Hoon Lee, Young-Sik Lee, Pill-Soo Choi
Pukyong Nat. Univ. KESCO, Buil Instech co.

Abstract -In this study electromagnetic fields under power lines were derived by dipole antenna theory and electric fields under high voltage power lines were discussed with dependence of power factor $\cos\phi$. And also electromagnetic fields under 3 phase power lines with horizontal and vertical configurations were formulated.

1. 서 론

1970년대 말 전력설비에 의해 발생하는 전계 및 자계가 인체에 영향을 줄 수 있다는 것이 최초로 지적된 이래 이 주제에 대한 연구가 여러 나라에서 폭넓게 진행되어 왔다. 최근에는 초고압 및 대전류 전력설비와 더불어 전력선로에 둘러 싸여 있는 전자 환경의 생체에 미치는 효과가 점차 중요한 과제로 대두되고 있다.[1]

초저주파(ELF: extremely low frequency) 전계 및 자계의 파장은 생체의 크기보다 훨씬 크므로 전계 및 자계를 각각 독립적으로 취급할 수 있다. 그러나 생체가 전계 및 자계에 동시에 노출될 때 생체내부의 유도전류는 전계 및 자계에 의한 유도전류를 결합하여 조사할 필요가 있다. 특히 인체가 고전압 전력선으로부터 각기 다른 거리에 위치해 있을 때 인체내부의 전계와 자계 및 관련된 전류의 방향과 크기는 무엇인가가 중요한 해결과제로 된다. 한편 낮은 값의 자계에서도 비디오 디스플레이(컴퓨터 모니터 등)와 같은 설비에 저주파 자계가 교란을 일으킨다는 것은 널리 알려져 있는 사실이다. 특히 CAD워크스테이션의 대형 디스플레이 장치는 이러한 국면에 매우 민감하다. 또한 감도가 좋은 측정장비(예 전자현미경)나 의료용 장비에 유도장해 등의 영향을 줄 수도 있다. 이러한 전력주파수의 자계는 수많은 문헌에서 분석된 바 있다. 그러나 국내에서는 전력선하의 전자계에 대한 심도 있는 연구가 아직 미미한 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위한 첫 단계는 대지위에 가설된 전력선 근방의 모든 점에 대한 정전계 및 전자파전자계 성분을 정확하게 산정하고 이를 동시에 고려하는 것이다.

본 연구에서는 대지의 영향을 고려한 전력선로하의 전계 및 전자파 전자계의 계산식을 유도하였으며 정전계와 전자파전자계로 구성된 합성전계에 미치는 역률의 영향에 대하여도 검토하였다.

2. 시뮬레이션

2.1 정전계

그림 2-1과 같이 대지표면위 h [m]의 높이에 선밀도 q [C/m]의 전하를 갖는 반경 a [m] ($h \gg a$)의 전력선 A가 대지와 평행하게 가설되어 있는 경우의 전계를 고려하기로 하며 전력선은 무한장 직선도체로 간주하기로 한다.

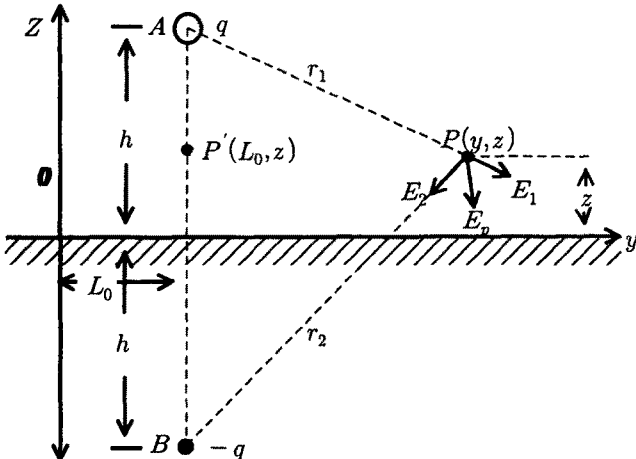


Fig. 2.1 Electric field under electric power line

대지를 평면도체로 보면 대지는 0전위이므로 전력선 A의 대지면에 대한 대칭점 B에 선밀도 $-q$ [C/m]의 영상도선을 평행하게 배열한 경우와 같으며 도선의 선전하는 중심축에 집중되어 있는 것으로 볼 수 있다. 따라서 대지면 위 h_0 [m]의 임의의 점 $P(y, z)$ 의 수평방향 전계성분 E_y 및 수직방향 전계성분 E_z 는 식(2.1) 및 (2.2)와 같다.

$$E_x = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{y-L_0}{r_1^2} - \frac{y-L_0}{r_2^2} \right) \tag{2.1}$$

$$E_z = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{h-z}{r_1^2} + \frac{h+z}{r_2^2} \right) \tag{2.2}$$

$$\text{단, } r_1 = \sqrt{(y-L_0)^2 + (h-z)^2}$$

$$r_2 = \sqrt{(y-L_0)^2 + (h+z)^2}$$

또 AB선상의 임의의 점 $P'(L_0, z)$ 의 전계 E_p 를 구하면 식(2.3)과 같이 된다.

$$E_z = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{h-z} + \frac{1}{h+z} \right) \tag{2.3}$$

따라서 전력선 A의 대지에 대한 전위 V_A 는 식(2.4)가 된다.

$$V_A = \int_0^{h-a} E_p \cdot dz = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h-a}{a} \approx \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{a} \tag{2.4}$$

식(2.4)로부터 전력선 A의 전하밀도 q 를 구하면 식(2.5)가 얻어진다.

$$q = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2h}{a}} \cdot V_A \tag{2.5}$$

그러므로 P점의 전계성분 E_y 및 E_z 는 식 (2.6) 및 (2.7)과 같이 구할 수 있다.

$$E_y = \frac{V_A \cdot (y-L_0)}{\ln \frac{2h}{a}} \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right) \tag{2.6}$$

$$E_z = \frac{V_A}{\ln \frac{2h}{a}} \left(\frac{h-z}{r_1^2} + \frac{h+z}{r_2^2} \right) \tag{2.7}$$

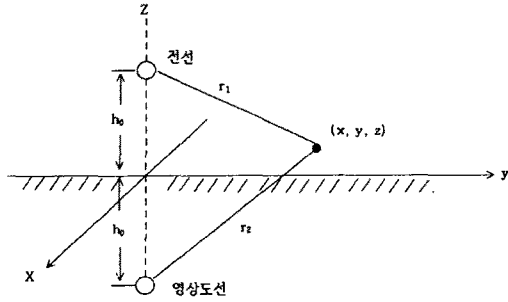
또 점 P의 합성전계 E_s 는 식 (2.8)로 주어진다.

$$E_s = \sqrt{E_y^2 + E_z^2} \tag{2.8}$$

2.2 쌍극자 안테나 이론에 의한 전자파 전자계

그림 2.2와 같이 평면대지상의 높이 h_0 에 전력선이 가설되어 있는 경우로서 전선의 방향을 x 방향으로 한 직각 좌표계를 고려하여 지상의 임의점 (x, y, z) 에서의 전자파 전자계를 구해보기로 한다. 전력선을 무한장 직선도체라 하고 전류는 식 (2.9)의 정현파 전류를 가정하며 대지의 깊이 $-h_0$ 에 흐르는 전류영상을 고려하기로 한다.

$$i(t) = I e^{j\omega t} \tag{2.9}$$



<Fig. 2.2> Rectangular coordinates

이 전력선을 쌍극자 안테나에 대비시키면 미소길이 dx' 에 대한 쌍극자 능률은 $i(t) \cdot dx'$ 로 주어지며 단위길이에 대한 벡터포텐셜은 식 (2.10)으로 쓸 수 있다.

$$A = \frac{I}{4\pi} \left[\frac{1}{r_1} e^{j(\omega t - k_0 r_1)} - \frac{1}{r_2} e^{j(\omega t - k_0 r_2)} \right] \cdot \hat{x} \quad (2.10)$$

$$r_1 = [x^2 + y^2 + (z - h_0)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$r_2 = [x^2 + y^2 + (z + h_0)^2]^{\frac{1}{2}}$$

여기서 k_0 는 공기의 파정수로서 식 (2.31)에서 알 수 있는 바와 같이 $\frac{\omega}{v} = \frac{\omega}{c}$ 에 해당되며 \hat{x} 는 x 방향의 단위벡터이다. 따라서 자계 H 및 자속밀도 B 는 식 (2.11) 및 (2.12)로 주어진다.

$$H = \nabla \times A = \frac{I}{4\pi} e^{j\omega t} \left\{ \left[e^{-jk_0 r_1} \left(-\frac{jk_0}{r_1^2} - \frac{1}{r_1^3} \right) (z - h_0) - e^{-jk_0 r_2} \left(-\frac{jk_0}{r_2^2} - \frac{1}{r_2^3} \right) (z + h_0) \right] \hat{y} + \left[e^{-jk_0 r_1} \left(\frac{jk_0}{r_1^2} - \frac{1}{r_1^3} \right) - e^{-jk_0 r_2} \left(\frac{jk_0}{r_2^2} + \frac{1}{r_2^3} \right) \right] \cdot y \cdot \hat{z} \right\} = H_y \hat{y} + H_z \hat{z} \quad (2.11)$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} e^{j\omega t} \left\{ \left[e^{-jk_0 r_1} \left(-\frac{jk_0}{r_1^2} - \frac{1}{r_1^3} \right) (z - h_0) - e^{-jk_0 r_2} \left(-\frac{jk_0}{r_2^2} - \frac{1}{r_2^3} \right) (z + h_0) \right] \hat{y} + \left[e^{-jk_0 r_1} \left(\frac{jk_0}{r_1^2} - \frac{1}{r_1^3} \right) + e^{-jk_0 r_2} \left(\frac{jk_0}{r_2^2} + \frac{1}{r_2^3} \right) \right] \cdot y \cdot \hat{z} \right\} = B_y \hat{y} + B_z \hat{z} \quad (2.12)$$

여기서 \hat{y} 및 \hat{z} 는 각각 y 방향 및 z 방향의 단위 벡터이다. 이상의 자계를 무한장 직선도체의 경우로 확장하고 대지내의 반사파를 고려하여 정리하면 식 (2.13) 및 식 (2.14)로 된다.

$$B_y = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[-\frac{z - h_0}{y^2 + (z - h_0)^2} + \frac{z + h_0}{y^2 + (z + h_0)^2} + \frac{4(z + d)(k_0 h_0)}{k_1^2 [y^2 + (z + h_0)^2]^2} \left(1 - \frac{2[(z + h_0)^2 - y^2]}{y^2 + (z + h_0)^2} \right) \right] \quad (2.13)$$

여기서 인수 $(k_0 h_0)$ 는 보정계수이다.

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2\pi} y \left[\frac{1}{y^2 + (z - h_0)^2} - \frac{1}{y^2 + (z + h_0)^2} + \frac{4(k_0 h_0)}{k_1^2 [y^2 + (z + h_0)^2]^2} \left(1 + \frac{2[(z + h_0)^2 - y^2]}{y^2 + (z + h_0)^2} \right) \right] \quad (2.14)$$

한편 전계와 자계의 관계는 맥스웰 필드 방정식에 의해 정현파의 경우는 식 (2.15)로 된다.

$$j\omega \epsilon_0 E = \nabla \times H \quad (2.15)$$

전자파 전계의 경우도 자계와 동일한 방법으로 근사화 할 수 있으며 식 (2.16) 및 (2.17)이 얻어진다.

$$E_y = \frac{\omega \mu_0 I}{2\pi k_0} \left[\frac{y}{y^2 + (z - h_0)^2} - \frac{y \left(1 - \frac{2k_0^2}{k_1^2} \right)}{y^2 + (z + h_0)^2} \right] \quad (2.16)$$

$$E_z = \frac{\omega \mu_0 I}{2\pi k_0} \left[\frac{z - h_0}{y^2 + (z - h_0)^2} - \frac{z + h_0}{y^2 + (z + h_0)^2} \right] \quad (2.17)$$

따라서 합성전자파전계 E_m 은 식 (2.18)로 주어진다.

$$E_m = \sqrt{E_y^2 + E_z^2} \quad (2.18)$$

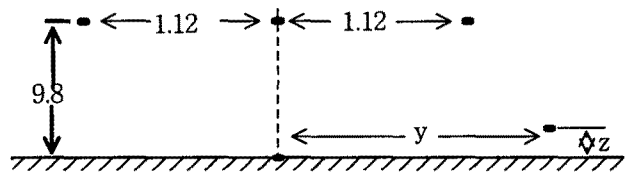
2.3 합성전계의 역률 의존성

이상에서 알 수 있는 바와 같이 정전계는 선로전압에 의존하며 전자파 전계는 선로 전류에 의존한다. 따라서 이 두 가지 전계성분은 역률각 ϕ 만큼 위상차를 갖게 되며 그 합성전계도 역률각에 의존하게 된다. 정전계 E_s 와 전자파전계 E_m 의 합성전계 E_t 를 수식으로 나타내면 식 (2.19)와 같다.

$$E_t = \sqrt{(E_s + E_m \cos \phi)^2 + E_m^2 \sin^2 \phi} \quad (2.19)$$

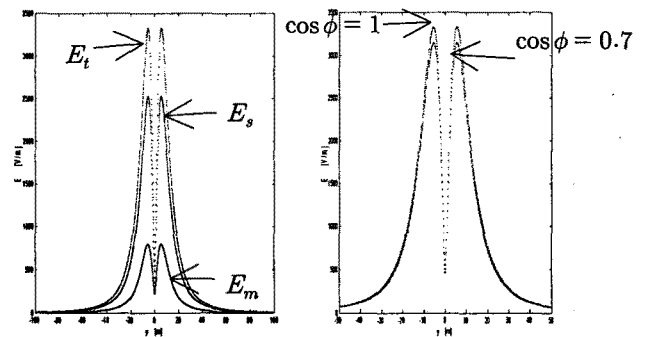
그림 2.3은 전선배열의 한 예로서 수평배열 3상전력선에 대하여 정전계, 전자파 전계 및 합성전계를 계산하였다. 각 상의 전류는 500[A]로 하였으며 전압은 22.9[kV]로 하였다. 또한 주파수 $f=60$ [Hz], 대지의 도전율 $\sigma_1=0.04$ [S/m], $k_0=4\pi \times 10^{-7}$,

$k_1 = (j\omega \mu_0 \sigma_1)^{\frac{1}{2}}$ 을 사용하여 계산하였다.



<Fig. 2.3> Configuration of electric power lines

그림 2.4는 역률 $\cos \phi = 1$ 의 경우, 정전계 및 전자파전계 및 합성전계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 정전계와 전자파전계의 변화양상이 같으며 합성전계값은 두 전계 성분 중 큰 것보다 크다. 그림 2.5는 합성전계의 역률 의존성을 알아보기 위하여 $\cos \phi = 1$ 의 경우와 $\cos \phi = 0.7$ 의 경우의 합성전계를 나타낸 것으로서 역률이 클수록 합성전계가 큼을 알 수 있다.



<Fig. 2.4> Electric field E_s, E_m, E_t < Fig. 2.5> Dependence of resultant electric field E_t on $\cos \phi$.

3 결론

본 연구에서는 전력선하에서 발생하는 전자파자계를 쌍극자이론을 도입하여 유도하였으며 고압전선로하의 전계에 대하여도 역률의존성과 함께 검토하였다. 수평전선 배열 및 수직전선배열의 전선로에 대하여 전자파자계 및 전계에 대한 식을 도출하여 이를 정식화 하였다.

[참고 문헌]

- [1] Dawson TW., Caputa K., Stuchly MA., " Influence of human model resolution on computed currents induced in organs by 60Hz magnetic fields ", Bioelectromagnetics, Vol.18, PP.478-490, 1997