

3상 전력선로하의 전계 및 자속밀도 계산

이영식^{*}, 박정은^{*}, 노일수^{**}, 강대하^{**}
^{*}한국전기안전공사, ^{**}부경대

Calculation of Electric Field and Magnetic Flux Density under 3-Phase Power Lines

Y. S. Lee^{*}, J. E. Park^{*}, I. S. Noh^{**}, D. H. Kang^{**}
^{*}KESCO, ^{**}Pukyong National University

Abstract - In this study the formula of electro magnetic fields under 3-phase power lines with vertical or horizontal line-configurations were deduced and the effect of the earth was considered in the formula. Using the formula the electric field and the magnetic flux density under distribution and transmission lines constructed currently in our country were calculated and the components of each field were investigated with horizontal distance from tower and height above the earth.

1. 서 론

오늘날 전력수요의 증가와 함께 송전전압은 특고압, 초고압화되고 전력계통은 대전류설비로 구성되고 있어 송배전설로부터 발생하는 전자계에 대한 우려는 더욱 높아지고 있다. 이러한 시점에서 송배전 선로로부터 발생하는 전계 및 자계의 정확한 계산이 필요하며 이를 고려한 송배전선로의 설계가 이루어져야 할 것이다.

본 연구에서는 대지의 영향을 고려한 전력선로하의 전계 및 자속밀도의 계산식을 정식화하였으며 현재 가설되어 있는 22.9 [KV] 배전선로 및 154 [KV], 345 [KV], 765 [KV] 송전선로에 적용하여 전계 및 자속밀도의 크기 및 위상각 특성을 조사하였다.

2.3상 전력선로의 전계 및 자속밀도 계산

2.1 정식화

2.1.1 전계

3상 전력선로의 전압을 평형3상 정현파전압으로 가정하면 각 상의 전압은 식 (2.1) ~ 식 (2.3)으로 주어진다.

$$\dot{V}_a = V \tag{2.1}$$

$$\dot{V}_b = V e^{-j\frac{4}{3}\pi} \tag{2.2}$$

$$\dot{V}_c = V e^{-j\frac{2}{3}\pi} \tag{2.3}$$

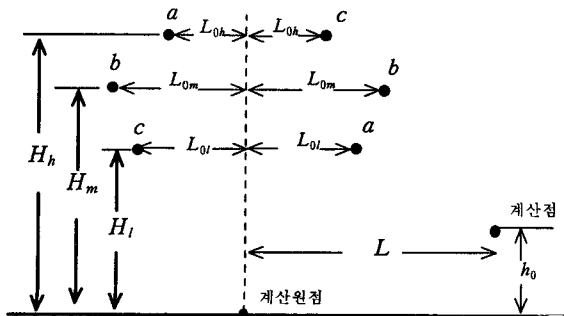


그림 1 3상 2회선 수직 전선배열

그림 1과 같은 3상 2회선 수직전선배열을 고려하면 계산원점으로부터의 수평거리 L [m], 높이 h₀[m]인 점의 수평방향 전계성분 \vec{E}_x 및 수직방향 전계성분 \vec{E}_z 는 식 (2.4) 및 (2.5)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{E}_x = & \dot{V}_a \left[\frac{L + L_{0h}}{\ln \frac{2H_h}{r_e}} \left(\frac{1}{R_{al_1}^2} - \frac{1}{R_{al_2}^2} \right) + \frac{L - L_{0l}}{\ln \frac{2H_l}{r_e}} \left(\frac{1}{R_{ar_1}^2} - \frac{1}{R_{ar_2}^2} \right) \right] \\ & + \dot{V}_b \left[\frac{L + L_{0m}}{\ln \frac{2H_m}{r_e}} \left(\frac{1}{R_{bl_1}^2} - \frac{1}{R_{bl_2}^2} \right) + \frac{L - L_{0m}}{\ln \frac{2H_m}{r_e}} \left(\frac{1}{R_{br_1}^2} - \frac{1}{R_{br_2}^2} \right) \right] \\ & + \dot{V}_c \left[\frac{L + L_{0l}}{\ln \frac{2H_l}{r_e}} \left(\frac{1}{R_{cl_1}^2} - \frac{1}{R_{cl_2}^2} \right) + \frac{L - L_{0h}}{\ln \frac{2H_h}{r_e}} \left(\frac{1}{R_{cr_1}^2} - \frac{1}{R_{cr_2}^2} \right) \right] \end{aligned} \tag{2.4}$$

$$\begin{aligned} \vec{E}_z = & \dot{V}_a \left[\frac{1}{\ln \frac{2H_h}{r_e}} \left(\frac{H_h - h_0}{R_{al_1}^2} + \frac{H_h + h_0}{R_{al_2}^2} \right) + \frac{1}{\ln \frac{2H_l}{r_e}} \left(\frac{H_l - h_0}{R_{ar_1}^2} + \frac{H_l + h_0}{R_{ar_2}^2} \right) \right] \\ & + \dot{V}_b \left[\frac{1}{\ln \frac{2H_m}{r_e}} \left(\frac{H_m - h_0}{R_{bl_1}^2} + \frac{H_m + h_0}{R_{bl_2}^2} \right) + \frac{1}{\ln \frac{2H_m}{r_e}} \left(\frac{H_m - h_0}{R_{br_1}^2} + \frac{H_m + h_0}{R_{br_2}^2} \right) \right] \\ & + \dot{V}_c \left[\frac{1}{\ln \frac{2H_l}{r_e}} \left(\frac{H_l - h_0}{R_{cl_1}^2} + \frac{H_l + h_0}{R_{cl_2}^2} \right) + \frac{1}{\ln \frac{2H_h}{r_e}} \left(\frac{H_h - h_0}{R_{cr_1}^2} + \frac{H_h + h_0}{R_{cr_2}^2} \right) \right] \end{aligned} \tag{2.5}$$

$$\begin{aligned} \text{단, } R_{al_1} &= \sqrt{(L + L_{0h})^2 + (H_h - h_0)^2} \\ R_{al_2} &= \sqrt{(L + L_{0h})^2 + (H_h + h_0)^2} \\ R_{bl_1} &= \sqrt{(L + L_{0m})^2 + (H_m - h_0)^2} \\ R_{bl_2} &= \sqrt{(L + L_{0m})^2 + (H_m + h_0)^2} \\ R_{cl_1} &= \sqrt{(L + L_{0l})^2 + (H_l - h_0)^2} \\ R_{cl_2} &= \sqrt{(L + L_{0l})^2 + (H_l + h_0)^2} \\ R_{ar_1} &= \sqrt{(L - L_{0l})^2 + (H_l - h_0)^2} \\ R_{ar_2} &= \sqrt{(L - L_{0l})^2 + (H_l + h_0)^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R_{br_1} &= \sqrt{(L-L_{0m})^2 + (H_m - h_0)^2} \\
R_{br_2} &= \sqrt{(L-L_{0m})^2 + (H_m + h_0)^2} \\
R_{cr_1} &= \sqrt{(L-L_{0h})^2 + (H_h - h_0)^2} \\
R_{cr_2} &= \sqrt{(L-L_{0h})^2 + (H_h + h_0)^2} \\
r_e &: \text{전선의 등가반경}
\end{aligned}$$

따라서 식(2.4) 및 (2.5)에 식 (2.1) ~ 식 (2.3)을 대입하고 수평방향 전계성분 \vec{E}_x 및 수직방향 전계성분 \vec{E}_z 를 구하면 식 (2.6) 및 (2.7)이 얻어진다.

$$\begin{aligned}
\vec{E}_x &= V \left[R_{\alpha x} - \frac{1}{2} (R_{bx} + R_{cx}) \right] - j \frac{\sqrt{3}}{2} V (R_{bx} - R_{cx}) \\
&= E_{xr} + jE_{xi} \quad (2.6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\vec{E}_z &= V \left[R_{\alpha z} - \frac{1}{2} (R_{bz} + R_{cz}) \right] - j \frac{\sqrt{3}}{2} V (R_{bz} - R_{cz}) \\
&= E_{zr} + jE_{zi} \quad (2.7)
\end{aligned}$$

단,

$$R_{\alpha} = \frac{L+L_{oh}}{\ln \frac{2H_h}{r_e}} \left(\frac{1}{R_{a1}^2} - \frac{1}{R_{a2}^2} \right) + \frac{L-L_{ol}}{\ln \frac{2H_l}{r_e}} \left(\frac{1}{R_{o1}^2} - \frac{1}{R_{o2}^2} \right)$$

$$R_{\alpha} = \frac{L+L_{om}}{\ln \frac{2H_m}{r_e}} \left(\frac{1}{R_{b1}^2} - \frac{1}{R_{b2}^2} \right) + \frac{L-L_{om}}{\ln \frac{2H_m}{r_e}} \left(\frac{1}{R_{b1}^2} - \frac{1}{R_{b2}^2} \right)$$

$$R_{\alpha} = \frac{L+L_{ol}}{\ln \frac{2H_l}{r_e}} \left(\frac{1}{R_{c1}^2} - \frac{1}{R_{c2}^2} \right) + \frac{L-L_{oh}}{\ln \frac{2H_h}{r_e}} \left(\frac{1}{R_{c1}^2} - \frac{1}{R_{c2}^2} \right)$$

$$R_{\alpha} = \frac{1}{\ln \frac{2H_h}{r_e}} \left(\frac{H_h - h_0}{R_{a1}^2} + \frac{H_h + h_0}{R_{a2}^2} \right) + \frac{1}{\ln \frac{2H_l}{r_e}} \left(\frac{H_l - h_0}{R_{o1}^2} + \frac{H_l + h_0}{R_{o2}^2} \right)$$

$$R_{\alpha} = \frac{1}{\ln \frac{2H_m}{r_e}} \left(\frac{H_m - h_0}{R_{b1}^2} + \frac{H_m + h_0}{R_{b2}^2} \right) + \frac{1}{\ln \frac{2H_m}{r_e}} \left(\frac{H_m - h_0}{R_{b1}^2} + \frac{H_m + h_0}{R_{b2}^2} \right)$$

$$R_{\alpha} = \frac{1}{\ln \frac{2H_l}{r_e}} \left(\frac{H_l - h_0}{R_{c1}^2} + \frac{H_l + h_0}{R_{c2}^2} \right) + \frac{1}{\ln \frac{2H_h}{r_e}} \left(\frac{H_h - h_0}{R_{c1}^2} + \frac{H_h + h_0}{R_{c2}^2} \right)$$

식 (2.6) 및 (2.7)로부터 알수 있는 바와 같이 \vec{E}_x 및 \vec{E}_z 는 복소함수로 주어지므로 위상각을 갖게 된다. 따라서 \vec{E}_x 및 \vec{E}_z 의 크기 및 위상각은 식 (2.8)~식 (2.11)로 주어진다.

$$E_x = \sqrt{E_{xr}^2 + E_{xi}^2} \quad (2.8)$$

$$\theta_x = \tan^{-1} \frac{E_{xi}}{E_{xr}} \quad (2.9)$$

$$E_z = \sqrt{E_{zr}^2 + E_{zi}^2} \quad (2.10)$$

$$\theta_z = \tan^{-1} \frac{E_{zi}}{E_{zr}} \quad (2.11)$$

또 합성전계의 크기 및 위상각을 구하면 식 (2.12) 및 (2.13)으로 주어진다.

$$\begin{aligned}
E &= \left[\left\{ E_x^2 \cos(2\theta_x) + E_z^2 \cos(2\theta_z) \right\}^2 \right. \\
&\quad \left. + \left\{ E_x^2 \sin(2\theta_x) + E_z^2 \sin(2\theta_z) \right\}^2 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.12)
\end{aligned}$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{E_x^2 \sin(2\theta_x) + E_z^2 \sin(2\theta_z)}{E_x^2 \cos(2\theta_x) + E_z^2 \cos(2\theta_z)} \quad (2.13)$$

2.1.2 자계

3상 전력선로의 전류를 평행 3상 정현파 전류로 가정하면 각 상의 전류는 식 (3.22) ~ 식 (3.24)로 주어진다.

$$I_a = I \quad (3.22)$$

$$I_b = I e^{-j\frac{4}{3}\pi} \quad (3.23)$$

$$I_c = I e^{-j\frac{2}{3}\pi} \quad (3.24)$$

그림 2-1과 같은 3상 2회선 수직전선 배열을 고려하면 계산원점으로 부터의 수평거리 L[m], 높이 h_0 [m]인 점의 수평방향 자속밀도성분 \vec{B}_x 및 수직방향 자속밀도성분 \vec{B}_z 는 (2.25) 및 식 (2.26)으로 주어진다.

$$\begin{aligned}
\vec{B}_x &= \frac{\mu_0 I_a}{2\pi} \left(\frac{H_h - h_0}{R_{a1}^2} + \frac{H_e + h_0}{R_{a2}^2} + \frac{H_l - h_0}{R_{o1}^2} + \frac{H_e + h_0}{R_{o2}^2} \right) \\
&\quad + \frac{\mu_0 I_b}{2\pi} \left(\frac{H_m - h_0}{R_{b1}^2} + \frac{H_e - h_0}{R_{b2}^2} + \frac{H_m - h_0}{R_{b1}^2} - \frac{H_e + h_0}{R_{b2}^2} \right) \\
&\quad + \frac{\mu_0 I_c}{2\pi} \left(\frac{H_l - h_0}{R_{c1}^2} + \frac{H_e - h_0}{R_{c2}^2} + \frac{H_h - h_0}{R_{c1}^2} - \frac{H_e + h_0}{R_{c2}^2} \right) \quad (2.25)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\vec{B}_z &= \frac{\mu_0 I_a}{2\pi} \left[(L + L_{0h}) \left(\frac{1}{R_{a1}^2} - \frac{1}{R_{a2}^2} \right) \right. \\
&\quad \left. + (L - L_{0l}) \left(\frac{1}{R_{o1}^2} - \frac{1}{R_{o2}^2} \right) \right] \\
&\quad + \frac{\mu_0 I_b}{2\pi} \left[(L + L_{0m}) \left(\frac{1}{R_{b1}^2} - \frac{1}{R_{b2}^2} \right) \right. \\
&\quad \left. + (L - L_{0m}) \left(\frac{1}{R_{b1}^2} - \frac{1}{R_{b2}^2} \right) \right] \\
&\quad + \frac{\mu_0 I_c}{2\pi} \left[(L + L_{0l}) \left(\frac{1}{R_{c1}^2} - \frac{1}{R_{c2}^2} \right) \right. \\
&\quad \left. + (L - L_{0h}) \left(\frac{1}{R_{c1}^2} - \frac{1}{R_{c2}^2} \right) \right] \quad (2.26)
\end{aligned}$$

$$\text{단, } R_{a1} = \sqrt{(L + L_{0h})^2 + (H_h - h_0)^2}$$

$$R_{a2} = \sqrt{(L + L_{0h})^2 + (H_h + h_0)^2}$$

$$R_{o1} = \sqrt{(L - L_{0l})^2 + (H_l - h_0)^2}$$

$$R_{o2} = \sqrt{(L - L_{0l})^2 + (H_l + h_0)^2}$$

$$R_{b1} = \sqrt{(L + L_{0m})^2 + (H_m - h_0)^2}$$

$$R_{b2} = \sqrt{(L + L_{0m})^2 + (H_m + h_0)^2}$$

$$R_{br_1} = \sqrt{(L - L_{0m})^2 + (H_m - h_0)^2}$$

$$R_{br_2} = \sqrt{(L - L_{0m})^2 + (H_m + h_0)^2}$$

$$R_{c1} = \sqrt{(L + L_{0l})^2 + (H_l - h_0)^2}$$

$$R_{c2} = \sqrt{(L + L_{0l})^2 + (H_l + h_0)^2}$$

$$R_{cr1} = \sqrt{(L - L_{0h})^2 + (H_h - h_0)^2}$$

$$R_{cr2} = \sqrt{(L - L_{0h})^2 + (H_h + h_0)^2}$$

H_e : 등가 대지면의 깊이

따라서 식 (2.25) 및 (2.26)에 식 (2.22) ~ 식 (2.24)를 대입하면 식(2.27) 및 (2.28)가 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{B}_x &= \frac{\mu_0 I}{2\pi} [R_{ac} - \frac{1}{2}(R_{bc} + R_{cc})] - j \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} (R_{bc} - R_{cc}) \\ &= B_{xr} + jB_{xi} \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} \dot{B}_z &= \frac{\mu_0 I}{2\pi} [R_{as} - \frac{1}{2}(R_{bs} + R_{cs})] - j \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} (R_{bs} - R_{cs}) \\ &= B_{zr} + jB_{zi} \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\text{단, } R_{ac} = \left(\frac{H_h - h_0}{R_{a1}^2} + \frac{H_e + h_0}{R_{a2}^2} + \frac{H_l - h_0}{R_{ar1}^2} + \frac{H_e + h_0}{R_{ar2}^2} \right)$$

$$R_{bc} = \left(\frac{H_m - h_0}{R_{b1}^2} + \frac{H_e + h_0}{R_{b2}^2} + \frac{H_m - h_0}{R_{br1}^2} + \frac{H_e + h_0}{R_{br2}^2} \right)$$

$$R_{cc} = \left(\frac{H_l - h_0}{R_{c1}^2} + \frac{H_e + h_0}{R_{c2}^2} + \frac{H_h - h_0}{R_{cr1}^2} + \frac{H_e + h_0}{R_{cr2}^2} \right)$$

$$R_{as} = (L + L_{0a}) \left(\frac{1}{R_{a1}^2} - \frac{1}{R_{a2}^2} \right) + (L - L_{0l}) \left(\frac{1}{R_{ar1}^2} - \frac{1}{R_{ar2}^2} \right)$$

$$R_{bs} = (L + L_{0b}) \left(\frac{1}{R_{b1}^2} - \frac{1}{R_{b2}^2} \right) + (L - L_{0m}) \left(\frac{1}{R_{br1}^2} - \frac{1}{R_{br2}^2} \right)$$

$$R_{cs} = (L + L_{0l}) \left(\frac{1}{R_{c1}^2} - \frac{1}{R_{c2}^2} \right) + (L - L_{0h}) \left(\frac{1}{R_{cr1}^2} - \frac{1}{R_{cr2}^2} \right)$$

식 (2.27) 및 (2.28)에서 알 수 있는 바와 같이 전계의 경우와 마찬가지로 각 자속밀도성분은 복소함수로 주어진다. 따라서 \dot{B}_x 및 \dot{B}_z 의 크기 및 위상각은 식 (2.29) ~ 식 (2.32)으로 주어진다.

$$B_x = \sqrt{B_{xr}^2 + B_{xi}^2} \quad (2.29)$$

$$\theta_x = \tan^{-1} \frac{B_{xi}}{B_{xr}} \quad (2.30)$$

$$B_z = \sqrt{B_{zr}^2 + B_{zi}^2} \quad (2.31)$$

$$\theta_z = \tan^{-1} \frac{B_{zi}}{B_{zr}} \quad (2.32)$$

또 합성자속밀도의 크기 및 위상각은 식 (2.33) 및 (2.34)로 구해진다.

$$\begin{aligned} B &= [\{ B_x^2 \cos(2\theta_x) + B_z^2 \cos(2\theta_z) \}^2 \\ &\quad + \{ B_x^2 \sin(2\theta_x) + B_z^2 \sin(2\theta_z) \}^2]^{1/4} \quad (2.33) \end{aligned}$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{B_x^2 \sin(2\theta_x) + B_z^2 \sin(2\theta_z)}{B_x^2 \cos(2\theta_x) + B_z^2 \cos(2\theta_z)} \quad (2.34)$$

2.2 계산예

그림2 및 그림3은 계산예로서 154[kv] 송전선로의 각 전계성분 및 자속밀도성분 변화를 나타낸 것이다.

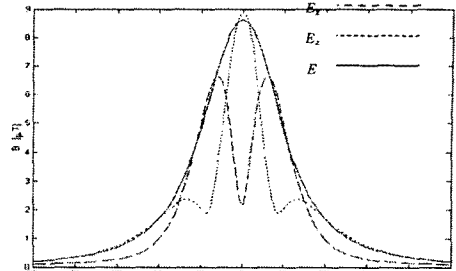


그림2. 154[kv] 송전선로의 전계성분의 변화($h_0=5[m]$).

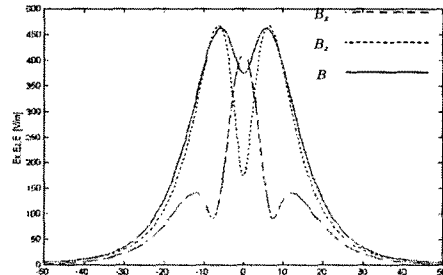


그림3. 154[kv] 송전선로의 자속밀도성분의 변화($h_0=5[m]$).

3. 결 론

본 연구에서는 3상 전력선로의 전계 및 자속밀도 계산에 대지의 영향을 고려하여, 수직전선배열 및 수평전선배열에 대한 계산식을 정식화 하였다. 또한 이 계산식을 현재 국내에 가설되어 있는 배전선로 및 송전선로에 적용하여 계산점의 수평거리 및 높이에 대한 전계 및 자속밀도의 성분변화를 조사하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 계산점의 높이가 낮을 경우 합성전계 및 합성자속밀도는 거의 수직방향성분에 의존한다.

(2) 계산점의 높이가 클수록 전계 및 자속밀도의 각성분이 증가하며 합성전계 및 합성자속밀도에 미치는 수평방향성분의 영향이 커진다.

(3) 수직전선배열의 경우보다 수평전선배열의 경우가 전계 및 자속밀도값이 훨씬 크며 특히 수평전선배열 345 [KV] 송전선로의 경우 첩탑으로부터의 수평거리 20 [m] 이내에서 국제 노출기준을 초과하여 발생한다.

(4) 전계 및 자속밀도의 수평방향성분 및 수직방향성분의 위상각은 수평거리에 따라 다양하게 변화하며 합성전계 및 합성자속밀도의 크기에 영향을 준다.

(참고 문헌)

(생략함)