

분기선로가 있는 3상 전력선로하의 전자파 자계 계산

(Calculation of Magnetic Fields under 3 Phase Power Lines with Branch Lines)

강대하* · 이영식 · 김부규

(Dae-Ha Kang · Yong-Sik Lee · Bu-Gyu Kim)

요 약

본 연구에서는 임의의 각도로 분기되어 있는 전력선로 근방의 자계를 유도하여 정식화 하였으며 이 공식을 이용함으로써 그 자계 계산을 쉽게 할 수 있다. 이 공식들은 분기선로가 있는 배전선로의 설계 시 검토자료로서 활용할 수 있을 것으로 생각된다. 예로서 자계요소에 관한 공식들을 분기선로가 있는 3상 배전선로 모델에 적용하여 메틀랩 프로그램에 의해 계산하였으며 그 결과를 제시하였다. 그 분석결과를 요약하면 다음과 같다. 합성자계는 분기각이 작고 관측점의 높이 z 가 낮으면 전 y -축상에 걸쳐 B_y 요소가 지배적이다. 이 합성자계는 분기각 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ [rad]의 경우 B_x 의 영향을 크게 받는다. 또한 이 합성자계는 전력선 높이와 같은 전선로 근방에서 B_z 요소가 지배적이며 분기각이 $\alpha > \frac{\pi}{2}$ [rad]의 경우에는 y 축의 분기전선 위치에서 매우 큰 값을 나타낸다.

Abstract

In this study magnetic fields near electric power lines with branch lines which have a arbitrary angle were derived and formulated by dipole antenna theory and could be calculated easily using the formula. It seems that those formula could be applicable to the consideration of magnetic fields during the design of distribution lines with branch lines. As an example those formulated equations on elements of magnetic fields were applied to a model of 3 phase distribution lines with branch lines and calculated by Matlab programs and the results were presented. The analyzed results are follows. The resultant magnetic field is dominated by the component B_y all over y -axis in the case of the smaller branched angle α and the lower observed point z . In case of $\alpha = \frac{\pi}{2}$ [rad], the resultant field is affected by the component B_x . The resultant field is dominated by the component B_z at the vicinity of the power lines and it shows very large value at the branch line position of y -axis in case of $\alpha > \frac{\pi}{2}$.

Key Words : Magnetic Fields, Electric Power Lines, Dipole Antenna Theory, Branch Lines

* 주저자 : 부경대학교 전기제어공학부 교수

Tel : 051-629-6311, Fax : 051-629-6305, E-mail : daeha@pknu.ac.kr

접수일자 : 2009년 4월 3일, 1차심사 : 2009년 4월 6일, 심사완료 : 2009년 4월 17일

1. 서 론

전기는 우리생활에 없어서는 안 될 필수적인 것으로서 현대생활의 전반에 미치는 총합적 에너지 요소라 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 최근 들어 저주파 전자계, 특히 전기설비에 의해 발생하는 저주파 자계에 관한 문제는 지속적인 주요 관심사로 대두되고 있다. 저주파 전자계가 생체에 대한 제한적 효과의 가능성을 지닌 매우 미약한 에너지임에도 불구하고 이러한 저주파 전자계의 방사가 인체에 위해를 줄 수 있다는 보고가 지속적으로 발표되고 있으며[1-11], 인체에 전류를 유도할 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 이러한 전류가 인체의 생물학적 전기활동에 의해 유도되는 자연적 전류보다 더 약한 값으로서 매우 작다는 보고도 있다[12-14]. 그러므로 세포의 죽음 및 유전자의 상호작용 또는 변형을 일으키는 생물학적 직접효과는 이 분야에 있어서 매우 불확실하다고 할 수 있다. 인체에 대한 위험성은 인체 내에 유도되는 전류의 발생 및 암을 포함한 신경계에 미치는 장기간의 열적 효과와 관련이 있다. 이러한 효과는 자계에 대한 노출이 심하거나 과도할 경우 더욱 현저하다. 그러나 저수준의 자계에 대한 노출의 효과는, 대부분의 작업장에서 경험한 바와 같이 지금까지 수집된 모든 과학적 근거가 어떠한 생체효과에도 연관 지을 수 있을 만큼 충분하다고 결론 지을 수 없다[WHO/193, 1998]. 그러함에도 불구하고 일부에서는 그것을 믿지 않거나 기분상의 변화를 유발한다든가 불면을 유발한다는 등의 인체에 대한 영향의 가능성을 지적하고 있다. 비록 자계방사에 대하여 ICNIRP(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)에 의해 제시된 한계값이 여러 공공기관 및 관계당국에서 받아들여지고는 있지만, 이러한 상황이 일반 대중에 널리 유포되고 있는 우려감을 감소시키는데 성공을 거두지 못하고 있다. 유럽의 경우 유럽의회 의장단 회의의 권고519/1999(Recommendation 519/1999), 즉 일반대중에 대하여 직접적이 아닌 권고안으로 서만 설정된 자계의 노출한계치를 발표했다는 사실은 별 도움이 되지 못하고 있었으나 현재에는 이

한계치를 많은 유럽 회원국의 법규에 포함시키고 있는 실정이며 우리나라에서도 권고치로서 이 기준을 따르고 있다. 따라서 전기관련 피고용자가 ICNIRP의 한계치를 초과한 자계의 노출을 피할 수 있는 작업공정을 만들어 주어야 하므로 전기설비에 대한 새로운 도전이 시작되었다고 할 수 있다. 유럽 회원국뿐만 아니라 많은 나라 및 WHO(World Health Organization), ILO(International Labour Organization), CENELEC(European Committee on Electrotechnical Standardization) 등의 국제기구에서도 ICNIRP의 한계값을 안전기준 값으로서 채택하고 있으며 그 전자파 전자계의 한계값은 다음과 같다.

직업 종사자: 10,000[V/m], 5,000[mG]

일반인: 5,000[V/m], 1,000[mG]

한편 낮은 값의 자속밀도에서도 비디오 디스플레이(컴퓨터 모니터등)와 같은 설비에 저주파 자계가 교란을 일으킨다는 것은 널리 알려져 있는 사실이다. 특히 CAD워크스테이션의 대형 디스플레이 장치는 이러한 국면에 매우 민감하다. 또한 저수준의 자계라 할지라도 감도가 좋은 측정장비(예 전자현미경)나 의료용 장비에 유도장해 등의 영향을 줄 수도 있다[15-20]. 이상과 같이 전자파가 인체에 미치는 영향에 대한 사회적 관심의 고조와 전자파에 의한 정밀기기 등의 유도장해 및 전자파 규제 문제의 대두로 전력선에 의한 전자파 전자계 계산 문제가 현실화되어 있는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 먼저 실제의 송전선로 및 배전선로 등의 전선배열에 대한 전자파 전자계를 어떻게 계산하는가가 선결과제이다. 이 문제가 해결되면 송전선로 및 배전선로의 설계초기부터 전자파 저감을 위한 전선배치 및 이격거리 등을 고려할 수 있을 것이다. 송배전선로 등 전력설비로부터 발생하는 전자파 자계의 이론적인 근거를 마련하기 위해서는 다도체의 경우에도 쉽게 적용하여 주위 공간의 전자파 자계를 구할 수 있는 계산식을 도출해야 하며 이 식을 이용하여 전력선로에 의한 전자파 자계를 설계 시 검토할 수 있다. 그러나 현재까지의 문헌들에서는 다도체에 적용할 수 있는 식을 구체적으로 제시한 예가 거의 없다. 3상 전선로와 같

분기선로가 있는 3상 전력선로아의 전자파 자계 계산

은 다도체의 경우에 대한 자계의 계산을 위해서는 개별 도체에 대한 자계의 3가지 요소 즉, B_x, B_y, B_z 를 정확하게 구하는 일이 중요하다. 일반적으로 이러한 자계의 계산에는 Biot-Savart 법칙을 이용한다. 그러나 송배전선로와 같은 다도체계에서는 대지의 영향을 무시할 수 없으며 이를 쉽게 고려하기 위해서는 Biot-Savart 법칙보다는 쌍극자 안테나 이론을 적용하는 것이 더욱 효과적이다. 문헌 [21]에서는 전력선로의 전자파 전자계 계산을 위해 쌍극자안테나 이론을 적용하여 대지의 반사파까지 고려한 완전해가 제시된 바 있다. 한편 가공 배전선로의 경우에는 분기 선로가 많으며 이러한 경우에도 전자계를 계산할 수 있는 이론적 근거가 필요하다.

본 연구에서는 임의의 각도의 분기선로가 있는 3상 전력선로에 대한 자계를 쌍극자 안테나 이론을 바탕으로 하여 도출함으로써 이를 쉽게 계산할 수 있는 이론적 근거를 마련하였다. 이와 같이 유도된 식들은 송전선로 및 배전선로의 설계 시 전자파 자계의 검토에 활용할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 메틀랩 프로그램을 이용한 계산결과를 예로서 제시하였다.

2. 전력선로의 전자파 이론

2.1 쌍극자 안테나 이론에 의한 전력선로의 전자파 자계

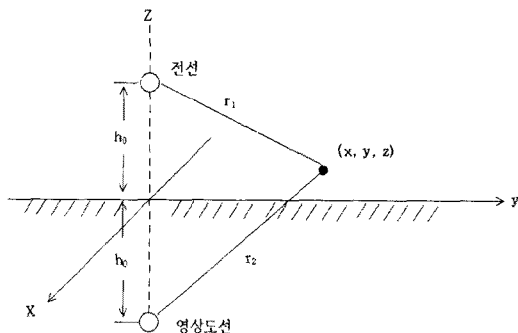


그림 2.1 직각좌표계
Fig. 2.1 Rectangular coordinates

그림 2.1과 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 자계를 구해보기로 한다. 전력선을 무한장 직선도체라 하고 전류는 식 (2.1)의 정현파 전류를 가정하며 대지의 깊이 h_0 에 흐르는 전류영상을 고려하기로 한다.

$$i(t) = Ie^{j\omega t} \quad (2.1)$$

이 전력선을 쌍극자 안테나에 대비시키면 미소길이 dx' 에 대한 쌍극자 능률은 $i(t) \cdot dx'$ 로 주어지며 단위길이에 대한 벡터퍼텐셜은 식 (2.2)로 쓸 수 있다.

$$A = \frac{I}{4\pi} \left[\frac{1}{r_1} e^{j(\omega t - k_0 r_1)} - \frac{1}{r_2} e^{j(\omega t - k_0 r_2)} \right] \hat{x} \quad (2.2)$$

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

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

여기서 k_0 는 공기의 파정수로서 $\frac{\omega}{v} = \frac{\omega}{c}$ 에 해당되며 \hat{x} 는 x 방향의 단위벡터이다. 따라서 자속밀도 B 는 식 (2.3)으로 주어진다.

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} e^{j\omega t} \left\{ \left[e^{-jk_0 r_1} \left(-\frac{jk_0}{r_1^2} - \frac{1}{r_1} \right) (z - h_0) - e^{-jk_0 r_2} \left(-\frac{jk_0}{r_2^2} - \frac{1}{r_2} \right) (z + h_0) \right] \hat{y} + \left[e^{-jk_0 r_1} \left(-\frac{jk_0}{r_1^2} - \frac{1}{r_1} \right) - e^{-jk_0 r_2} \left(-\frac{jk_0}{r_2^2} - \frac{1}{r_2} \right) \right] y \hat{z} \right\} = B_y \hat{y} + B_z \hat{z} \quad (2.3)$$

여기서 \hat{y} 및 \hat{z} 는 각각 y 방향 및 z 방향의 단위 벡터이다.

한편, 대지내부에서의 반사파도 고려해야 하므로 전자파의 자속밀도에 반사파를 고려하여 페이저 (Phasor)로서 취급함으로써 자계의 3 가지 요소를 구할 수 있다[22].

2.2 분기전선에 의한 전자파 자계

2.2.1 반무한장 직선도체에 의한 전자파 자계

먼저 그림 2.2와 같이 x_0 로부터 x' 의 무한대 방향으로 전류 I 가 흐르는 반무한장 직선도체에 의한 전자파 자계를 고려하기로 한다.

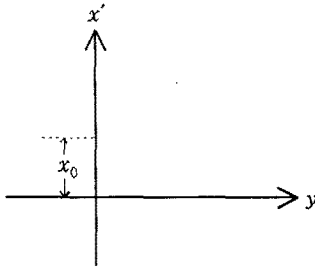


그림 2.2 x' 방향의 반무한장 직선도체
Fig. 2.2 Half-infinite line conductor of x' direction

식 (2.3)의 자계는 전류 I 가 흐르는 단위길이당의 쌍극자에 의한 전자파이므로 전 전선에 대한 전자파는 이 식들을 x' 방향에 대하여 적분하여야 한다. x_0 점에서 x' 의 방향은 x 의 반대 방향이므로 적분 시 이 식들 내의 x 대신에 $x - x'$ 를 대입하고, 전선과 직각방향 즉 y 축 상의 전자파 전자계를 고려하면 다음과 같은 식들을 쓸 수 있다.

$$[B_x]^+_{x=0} = \int_{x_0}^{\infty} \dot{B}_x e^{-jk_0 x'} dx' \quad (2.4)$$

$$[B_x]^-_{x=0} = \int_{-\infty}^{x_0} \dot{B}_x e^{-jk_0 x'} dx' \quad (2.5)$$

단, $s = x, y, z$

이 때 $[B_x]^+_{x=0} + [B_x]^-_{x=0}$ 는 x' 방향 무한장 직선도체에 의한 전자파의 자계의 크기가 된다.

이상의 적분을 수행하기 위하여 각 자계 성분 중 지배적 항만을 취하면 [21], 다음과 같은 적분식을 쓸 수 있다.

$$[B_x]^+_{x=0} \cong \frac{\mu_0 k_0 I}{2\pi k_1} \int_{x_0}^{\infty} e^{-jk_0 z} e^{-jk_0 x'} \frac{k_0}{k_1} \left[-\frac{15x'y(z+h_0)}{r_2^7 k_0^2} \right] dx' \quad (2.6)$$

$$[B_y]^+_{x=0} \cong \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{x_0}^{\infty} e^{-jk_0 z} \left[e^{-jk_0 x'} \frac{-(z-h_0)}{r_1^3} + e^{-jk_0 x'} \frac{(z+h_0)}{r_2^3} - e^{-jk_0 x'} \frac{2k_0^2}{k_1^2} \left\{ \frac{3(z+h_0)}{r_2^5 k_0^2} - \frac{15y^2(z+h_0)}{r_2^7 k_0^2} \right\} \right] dx' \quad (2.7)$$

$$[B_z]^+_{x=0} \cong \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{x_0}^{\infty} e^{-jk_0 z} \left[e^{-jk_0 x'} \frac{y}{r_1^3} - e^{-jk_0 x'} \frac{y}{r_2^3} + e^{-jk_0 x'} \frac{2k_0^2}{k_1^2} \left\{ \frac{12y}{r_2^5 k_0^2} + \left\langle \left(\frac{y}{r_2}\right)^2 + \left(\frac{x}{r_2}\right)^2 \right\rangle \frac{15y}{r_2^7 k_0^2} \right\} \right] dx' \quad (2.8)$$

x_0 하부전선의 경우에 대하여는 식 (2.6)~(2.8)에서 적분의 하한 및 상한을 $-\infty$ 및 x_0 로 바꾸면 된다. 실제적으로 60[Hz]에서 $k_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 으로서 매우 작은 값이므로 $e^{-jk_0 r_1} \cong e^{-jk_0 r_2} \cong 1$ 로 하고 $e^{-jk_0 x'} = \cos k_0 x' - jsin k_0 x' \cong 1 - jk_0 x'$ 을 취하여 이상의 식을 적분하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$[\dot{B}_x]^+_{x=0} = -\frac{j\mu_0 k_0 I}{2\pi k_1} y(z+h_0) \cdot \left[\frac{-2(x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2)^{5/2} + 5y^2 x_0^3 + 5(z+h_0)^2 x_0^3 + 2x_0^5}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^2 [y^2 + (z+h_0)^2]} \right] \quad (2.9)$$

$$[\dot{B}_y]^+_{x=0} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left[\frac{-(z-h_0)\{-x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{1/2}\}}{[x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^2 [y^2 + (z-h_0)^2]} + \frac{(z+h_0)\{-x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{1/2}\}}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^2 [y^2 + (z+h_0)^2]} + \frac{\mu_0 I}{2\pi k_1} (k_0 h_0)(z+h_0) \cdot \left[\frac{-2[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{3/2} + 3x_0 y^2 + 3x_0(z+h_0)^2 + 2x_0^3}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^2 [y^2 + (z+h_0)^2]} - \frac{y^2 \{-8[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{5/2} + 15x_0 y^4 + 30x_0 y^2(z+h_0)^2 + 15x_0(z+h_0)^4 + 20y^2 x_0^3 + 20(z+h_0)^2 x_0^3 + 8x_0^5\}}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^2 [y^2 + (z+h_0)^2]} \right] \right] \quad (2.10)$$

분기선로가 있는 3상 전력선로아의 전자파 자계 계산

$$\begin{aligned}
 [\dot{B}_z]_{x=0}^+ &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left[\frac{y\{-x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}}\}}{[x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}}[y^2 + (z-h_0)^2]} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{y\{-x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}}\}}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}}[y^2 + (z+h_0)^2]} \right] \\
 &\quad + \frac{\mu_0 I}{2\pi k_1^2} (k_0 k_0) y \\
 &\quad \bullet \left[\frac{-2[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} + 3x_0 y^2 + 3x_0(z+h_0)^2 + 2x_0^3}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}[y^2 + (z+h_0)^2]} \right. \\
 &\quad \left. \frac{(z+h_0)^2\{8[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} + 15x_0 y^4 + 30x_0 y^2(z+h_0)^2\}}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}[y^2 + (z+h_0)^2]} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{15x_0(z+h_0)^4 + 20y^2 x_0^3 + 20(z+h_0)^2 x_0^3 + 8x_0^5}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}[y^2 + (z+h_0)^2]} \right] \quad (2.11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [\dot{B}_z]_{x=0}^- &= -\frac{j\mu_0 k_0 I}{2\pi k_1} y(z+h_0) \\
 &\quad \bullet \left[\frac{\{2(x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2)^{\frac{5}{2}} + 5y^2 x_0^2 + 5(z+h_0)^2 x_0^3 + 2x_0^5\}}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}[y^2 + (z+h_0)^2]} \right] \quad (2.12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [\dot{B}_y]_{x=0} &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left[\frac{-(z-h_0)\{x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}}\}}{[x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}}[y^2 + (z-h_0)^2]} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{(z+h_0)\{x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}}\}}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}}[y^2 + (z+h_0)^2]} \right] \\
 &\quad + \frac{\mu_0 I}{2\pi k_1^2} (k_0 k_0)(z+h_0) \\
 &\quad \bullet \left[\frac{-2[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} + 3x_0 y^2 + 3x_0(z+h_0)^2 + 2x_0^3}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}[y^2 + (z+h_0)^2]} \right. \\
 &\quad \left. \frac{y^2\{8[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} + 15x_0 y^4 + 30x_0 y^2(z+h_0)^2\}}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}[y^2 + (z+h_0)^2]} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{15x_0(z+h_0)^4 + 20y^2 x_0^3 + 20(z+h_0)^2 x_0^3 + 8x_0^5}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}[y^2 + (z+h_0)^2]} \right] \quad (2.13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [\dot{B}_z]_{x=0}^- &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left[\frac{y(x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}})}{[x_0^2 + y^2 + (z-h_0)^2]^{\frac{1}{2}}[y^2 + (z-h_0)^2]} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{y(x_0 + [x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}})}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{1}{2}}[y^2 + (z+h_0)^2]} \right] \\
 &\quad + \frac{\mu_0 I}{2\pi k_1^2} (k_0 k_0) y \\
 &\quad \bullet \left[\frac{-2[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}} + 3x_0 y^2 + 3x_0(z+h_0)^2 + 2x_0^3}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{3}{2}}[y^2 + (z+h_0)^2]} \right. \\
 &\quad \left. \frac{(z+h_0)^2\{8[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}} + 15x_0 y^4 + 30x_0 y^2(z+h_0)^2\}}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}[y^2 + (z+h_0)^2]} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{15x_0(z+h_0)^4 + 20y^2 x_0^3 + 20(z+h_0)^2 x_0^3 + 8x_0^5}{[x_0^2 + y^2 + (z+h_0)^2]^{\frac{5}{2}}[y^2 + (z+h_0)^2]} \right] \quad (2.14)
 \end{aligned}$$

2.2.2 분기전선에 의한 전자파 자계

분기전선은 그림 2.3과 같이 x' 방향의 무한장 직선도체에 있어서 $x' = x_0$ 점에서 일정한 각도를 가지고 분기되어 있는 경우에 해당된다. 이와 같이 분기전선이 있는 경우의 자계를 해석하기 위해서는 먼저 그림 2.4와 같이 $x' = x_0$ 인 점에서 x' 축으로부터 각 α 만큼 기울어져 있는 경우를 해석해야 한다.

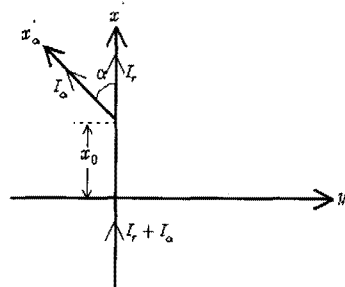


그림 2.3 분기전력선을 갖는 직선도체와 $x'-y$ 좌표계
Fig. 2.3 Power line with branch line and $x' - y$ rectangular coordinates

그림 2.4에서 분기전선 부분은 x_0 점에서 전류 I_0 가 x'_0 축의 무한대 방향으로 향하는 전선이며 이를 “분기전선부”, x' 축상에서 $-\infty$ 로부터 x_0 까지 전류 I_0 가 흐르는 전선 부분을 “기준전선부”라 하기로 한다.

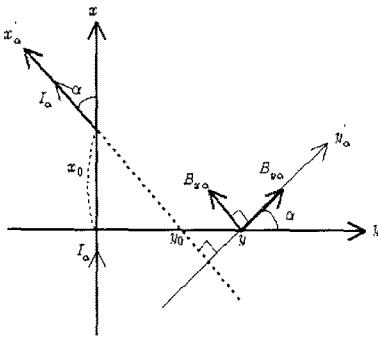


그림 2.4 분기전선부에 의한 전자계의 $x'_0 - y'_0$ 좌표계
Fig. 2.4 Branch line part and new rectangular $x'_0 - y'_0$ coordinates

분기전선부에 의한 자계는 $x' - y'$ 좌표계를 반시계방향으로 각 α 만큼 회전시키는 새로운 좌표계 즉 $x'_0 - y'_0$ 좌표계를 고려해야 하며 식 (2.9)~(2.11)의 x_0 및 y_0 대신에 x'_0 및 y'_0 를 대입시키면 된다. 여기서 x'_0 및 y'_0 를 $x - y - z$ 좌표계로 환산하면 다음과 같이 된다.

$$x'_0 = x \cos \alpha + y \sin \alpha \quad (2.15)$$

$$y'_0 = x_0 \tan \alpha \quad (2.16)$$

$$y'_0 = y \cos \alpha - x_0 \sin \alpha \quad (2.17)$$

그림 2.4의 y 점에서의 자계성분 $[\dot{B}_{x_0}]_{x_0=0}$ 및 $[\dot{B}_{y_0}]_{x_0=0}$ 은 그림과 같은 방향이며, 이것을 $x - y - z$ 좌표계로 환산하면 식 (2.27) 및 (2.28)로 주어진다.

$$[\dot{B}_x]_{x=0}^\alpha = [\dot{B}_{x_0}]_{x_0=0} \cos \alpha + [\dot{B}_{y_0}]_{x_0=0} \sin \alpha \quad (2.18)$$

$$[\dot{B}_y]_{x=0}^\alpha = -[\dot{B}_{x_0}]_{x_0=0} \sin \alpha + [\dot{B}_{y_0}]_{x_0=0} \cos \alpha \quad (2.19)$$

또 z_a 방향은 $x - y - z$ 좌표계의 방향과 동일하므로 z 방향성분 $[\dot{B}_z]_{x=0}^\alpha$ 는 식 (2.20)으로 주어진다.

$$[\dot{B}_z]_{x=0}^\alpha = [\dot{B}_{z_0}]_{x_0=0} \quad (2.20)$$

한편 기준전선부에 의한 자계는 $x - y - z$ 좌표계

의 값을 그대로 적용하면 된다. 따라서 기준전선부에 의한 자계 식 (2.21) 및 (2.22)으로 주어진다.

$$[\dot{B}_s]_{x=0}^r = [\dot{B}_s]_{x=0}^- \quad (2.21)$$

$$[\dot{E}_s]_{x=0}^r = [\dot{E}_s]_{x=0}^- \quad (2.22)$$

단, $s = x, y, z$

한편 실제적으로 그림 2.3과 같이 x_0 점에서 분기되어 있는 전력선의 경우, 전자파 자계는 식 (2.23)에 의해 계산할 수 있다.

$$[\dot{B}_s]_{x=0}^{\alpha r} = [\dot{B}_s]_{x=0}^r + [\dot{B}_s]_{x=0}^\alpha \quad (2.23)$$

간선의 기준전선부를 통하여 분기전선부에 흐르는 전류 I_0 에 의한 자계는 식 (2.23)에 $I = I_0$ 를 적용하면 되며 간선 즉 기준전선부를 포함한 무한장 직선도체에 흐르는 전류 $I = I_0$ 에 의한 자계는 식 (2.23)에 대하여 $\alpha = 0$ 및 $I = I_0$ 를 적용하면 된다. 따라서 분기전선이 있는 전력선의 전류에 의한 전자파 자계는 이 두가지 경우의 합성으로 주어진다.

3. 시뮬레이션에 의한 계산 예

그림 3.1과 같은 수평배열 전력선에 그림 2.2와 같은 분기전력선이 있는 경우의 자계를 고려하고 이를 계산하기로 한다. 편의상 분기전력선의 선간거리도 간선의 경우와 같은 것으로 한다.

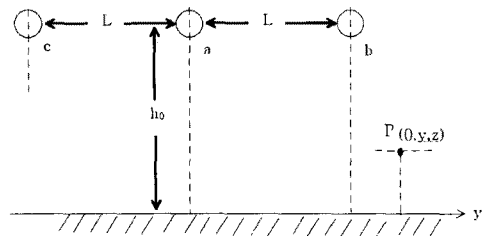


그림 3.1 3상 1회선 수평배열 전력선
Fig. 3.1 Horizontal configuration of 3 phase 1 circuit power line

분기선로가 있는 3상 전력선로아의 전자기 자계 계산

3상 전력선로의 전류를 평형 3상 정현파 전류로 가정하면 각 상의 전류는 식 (3.1)~(3.3)으로 주어진다.

$$\dot{I}_a = I \quad (3.1)$$

$$\dot{I}_b = Ie^{-j\frac{2}{3}\pi} \quad (3.2)$$

$$\dot{I}_c = Ie^{-j\frac{4}{3}\pi} \quad (3.3)$$

제 2장에서 도출된 전자파 전자계의 식에 대하여 대지의 파정수 $k_1 = j\omega\mu_0\sigma_1 = jk_1^2$ 을 고려하기로 한다. 3상전류에 의한 전자파 자계는 각상의 전선위치 및 전류를 2번 항에서 도출된 자계의 식에 적용하여 그 결과를 합성함으로써 계산할 수 있으며 자계 요소들은 식 (3.4) 및 (3.5)와 같은 형의 복소함수로 주어진다.

$$\dot{B}_s = B_{sr} + jB_{si} \quad (3.4)$$

$$\theta_{B_s} = \tan^{-1} \frac{B_{si}}{B_{sr}} \quad (3.5)$$

단, $s = x, y, z$

또한 전자파 합성 자계의 크기 및 그 위상각은 식 (3.6) 및 (3.7)로 주어진다.

$$B = \left[\left\{ B_{xr}^2 \cos(2\theta_{B_x}) + B_{yr}^2 \cos(2\theta_{B_y}) + B_{zr}^2 \cos(2\theta_{B_z}) \right\}^2 + \left\{ B_{xr}^2 \sin(2\theta_{B_x}) + B_{yr}^2 \sin(2\theta_{B_y}) + B_{zr}^2 \sin(2\theta_{B_z}) \right\}^2 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.6)$$

$$\theta_B = \tan^{-1} \frac{B_{xr}^2 \sin(2\theta_{B_x}) + B_{yr}^2 \sin(2\theta_{B_y}) + B_{zr}^2 \sin(2\theta_{B_z})}{B_{xr}^2 \cos(2\theta_{B_x}) + B_{yr}^2 \cos(2\theta_{B_y}) + B_{zr}^2 \cos(2\theta_{B_z})} \quad (3.7)$$

계산을 위한 프로그램은 매텔랩(MATLAB 6.5)에 의해 작성하였다. 그림 3.2는 2번 항에서 전개한 식 및 계산 프로그램의 검증을 위해 문헌 [22]의 전선배열을 사용하여 계산한 결과 중 자계성분 B_z 를 나타

낸 것이다. 계산에 사용한 전선배열의 정수는 분기 전선이 없는 경우로서 $\alpha=0, L=3[m], h_0=15[m]$ 이며, 전류는 300[A]이다. 이들 정수를 식 (2.23)에 적용함으로써 계산할 수 있다. 이상의 계산결과는 문헌 [22]의 결과와 완전 일치한다.

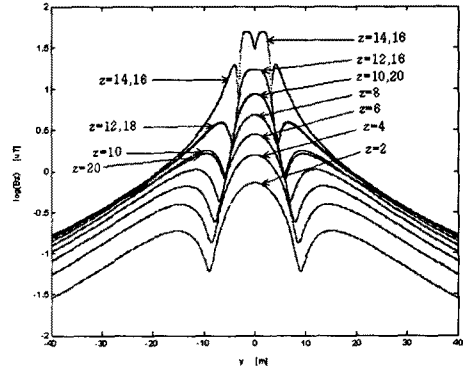


그림 3.2 문헌 [22]의 전선배열 정수를 사용한 자계성분 B_z 의 계산결과

Fig. 3.2 Calculation result of magnetic-field component B_z using the line-configuration constants of the reference [22]

실제적으로 분기전선로가 있는 경우는 22.9[kV] 배전선로가 대부분이므로 이를 대상으로 한 모델전력선로를 가정하기로 한다. 계산에 사용한 정수 및 전류는 표 3.1과 같다.

표 3.1 계산 정수 및 전류

Table 3.1 Parameters for calculation and line currents

계산 정수	기준전선부	분기전선부
전류[A]	600	300
h_0 [m]	15	13
L [m]	0.712	0.712
α [rad]	0	$0, \frac{\pi}{2}, \frac{2\pi}{3}$
σ [S/m]	0.04	0.04

그림 3.3~3.5은 $z=2[m]$ 에 있어서 각 분기각에 대하여 B_x, B_y, B_z 및 합성자계 B 를 함께 도시한 것이다. $\alpha=0$ 의 경우 y 의 전 구간에서 B_y 가 합성자계

B 에 지배적으로 기여한다. $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 의 경우에는 y 의 + 쪽에서 B_y 가, y 의 -쪽에서 B_x 가 합성자계 B 에 큰 영향을 미친다. $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ 의 경우에도 y 의 +쪽에서는 B_y , y 의 -쪽에서는 B_x 및 B_z 가 합성자계 B 에 미치는 영향이 크다. 이와 같은 B_x 의 합성자계 B 에 대한 영향은 분기전선에 기인한다.

그림 3.6~3.8은 $z = 13[m]$ 에 있어서 B_x, B_y, B_z 및 합성자계 B 를 각 분기각에 대하여 도시한 것이다. $\alpha = 0$ 의 경우 합성자계 B 에 가장 크게 기여하는 요소는 전력선로 근방에서 B_y 이며 그 이외의 구간에서는 B_z 가 크게 기여한다. $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 의 경우에도 $\alpha = 0$ 의 경우와 동일한 양상을 나타내나 y 의 -쪽에서는 분기선로에 의한 B_z 의 기여분이 커서 B 의 값이 $\alpha = 0$ 인 경우보다 크다. $\alpha = \frac{2}{3}\pi$ 의 경우에는 분기전력선이 y 축과 교차하는 지점 즉 $y_0 = x_0 \tan \alpha$ 의 위치에서 3개의 매우 큰 피크를 나타내며 y 축과 교차하는 분기전력선 표면의 자계를 반영한다.

이상에서 알 수 있는 바와 같이 합성자계 B 는 분기전선의 존재에 의해 B_x 의 기여분이 크게 된다. 또한 관측점이 낮은 위치에서는 전반적으로 B_y , 관측점의 위치가 높아서 전선의 높이에 이르게 되면 B_z 가 지배적으로 합성자계 B 에 기여한다.

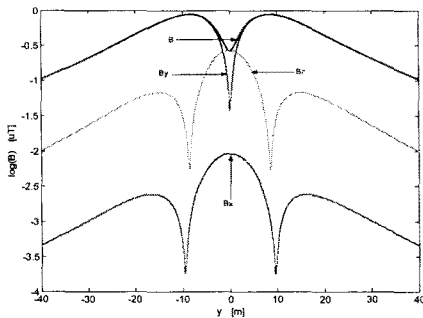


그림 3.3 $\alpha = 0, z = 1.5[m]$ 인 경우의 자계성분 B_x, B_y, B_z 및 B

Fig. 3.3 Magnetic fields B_x, B_y, B_z and B in case of $\alpha = 0, z = 1.5[m]$

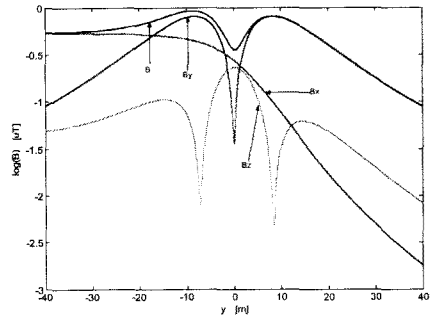


그림 3.4 $\alpha = \frac{\pi}{2}, z = 1.5[m]$ 인 경우의 자계성분

B_x, B_y, B_z 및 B

Fig. 3.4 Magnetic fields B_x, B_y, B_z and B in case of $\alpha = \frac{\pi}{2}, z = 1.5[m]$

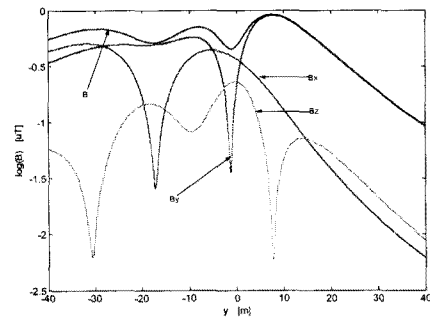


그림 3.5 $\alpha = \frac{2}{3}\pi, z = 1.5[m]$ 인 경우의 자계성분

B_x, B_y, B_z 및 B

Fig. 3.5 Magnetic fields B_x, B_y, B_z and B in case of $\alpha = \frac{2}{3}\pi, z = 1.5[m]$

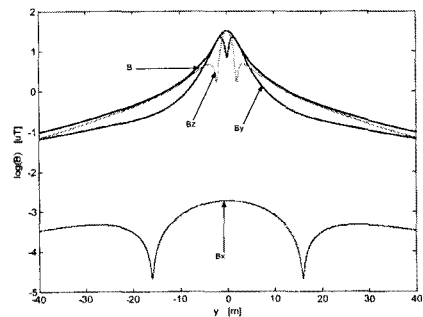


그림 3.6 $\alpha = 0, z = 13[m]$ 인 경우의 자계성분

B_x, B_y, B_z 및 B

Fig. 3.6 Magnetic fields B_x, B_y, B_z and B in case of $\alpha = 0, z = 13[m]$

분기선로가 있는 3상 전력선로하의 전자파 자계 계산

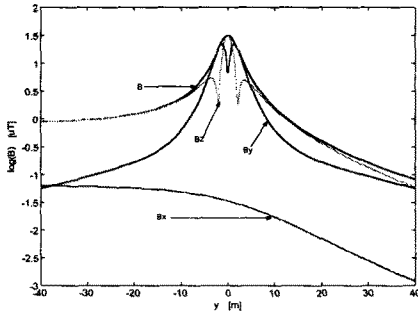


그림 3.7 $\alpha = \frac{\pi}{2}, z = 13[m]$ 인 경우의 자계성분 B_x, B_y, B_z 및 B
 Fig. 3.7 Magnetic fields B_x, B_y, B_z and B in case of $\alpha = \frac{\pi}{2}, z = 13[m]$

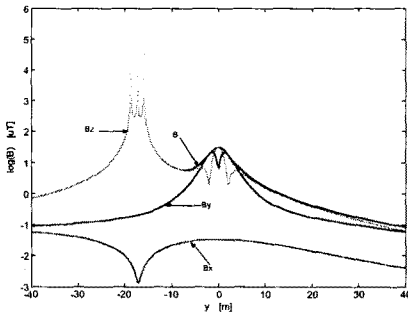


그림 3.8 $\alpha = \frac{2\pi}{3}, z = 13[m]$ 인 경우의 자계성분 B_x, B_y, B_z 및 B
 Fig. 3.8 Magnetic fields B_x, B_y, B_z and B in case of $\alpha = \frac{2\pi}{3}, z = 13[m]$

4. 결 론

본 연구에서는 전자파 자계의 계산에 있어서 실제 적 상황에 근접한 분기 선로가 있는 전력선을 고려하여 쉽게 계산할 수 있는 전자파 자계의 식을 도출하였다. 이 식들은 쌍극자 안테나 이론에 의하여 유도되었으며 이 식들을 이용함으로써 배전선로등의 설계시 전자파 자계의 검토에 활용할 수 있을 것으로 생각된다. 계산 예로서 수평전선배열의 전력선로에 대하여 적용하였으며 전자계 성분 B_x, B_y, B_z 와 분기 선로의 분기각 α 가 합성 전자계 B 에 미치는 영향을 분석하였다. 계산은 매텔랩에 의한 연산

프로그램을 직접 작성하여 행하였으며 그 분석결과 는 다음과 같다.

합성자계 B 는 관측점의 높이가 낮은 경우 분기 각 α 가 작으면 y 의 전 구간에 걸쳐 B_y 성분이 지배적이나, α 가 점점 커져 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 에 이르게 되면 B_x 의 영향을 가장 크게 받는다. 또 관측점의 높이가 커서 전선의 높이에 근접하면 합성자계 B 는 B_z 가 지배적이며 이 B_z 는 α 가 커짐에 따라 분기선로가 존재하는 y 의 위치에서 더욱 큰 값으로 된다.

References

- (1) N. W. Wertheimer, E. Leeper, "Electrical wiring configurations and childhood cancer", Am.J.Epidemiology, Vol. 109, pp. 273~284, 1979.
- (2) Isaka Ketal, "ELF electric and magnetic fields with human body", Proc.1988 U.S.- Japan Seminar on Electromagnetic-Interference in Highly Advanced Social Systems(Modeling, Characterization, Evaluation and Protection), No. 7, pp. 21~30, Hawaii, 1998.
- (3) Xi W., Stuchly MA., Gandhi OP., "High resolution organ dosimetry for human exposure to low-frequency electric fields", IEEE Trans. Biomed. Eng. Vol. 41, pp. 1018~1023, 1994.
- (4) Dawson TW., Caputa K., Stuchly MA., "Influence of human model resolution on computed currents induced in organs by 60(Hz) magnetic fields", Bioelectromagnetics, Vol. 18, pp. 478~490, 1997.
- (5) Feng Liu, Huawei Zhao and Stuart Crozier, "Calculation of electric fields induced by body and head motion in high-field MRI", Journal of Magnetic Resonance, Vol. 161, Issue 1, pp. 99~107, 2003.
- (6) Dragan Poljak, Andres Peratta and Carlos A. Brebbia, "The boundary element electromagnetic-thermal analysis of human exposure to base station antennas radiation", Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 28, Issue 7, pp. 763~770, 2004.
- (7) Yu-nan Han, Ying-hua LV and Hong-xin Zhang, "Compute extremely low- frequency electromagnetic field exposure by 3-D impedance method", The journal of China Universities of Posts and Telecommunications, Vol. 14, Issue 3, pp. 113~116, 2007.
- (8) I. Uloziene, V. Uloza, E. Gradauskiene, V. Saferis, "Assesment of potential effects of electromagnetic fields of mobile phones on hearing, BMC Public Health", Vol.5, No.39, pp.39.
- (9) REFLEX, "Risk Evaluation of Potential Enviroment Hazards from Low Energy Electromagnetic Field Exposure Using Sensitive in vitro Methods", Final Report, 2004.
- (10) National Research Council, "Possible Health Effects of Exposure to Residential Electric and Magnetic Fields", Vol.4, 1996.

- [11] J. E. Moulder, L. S. Erdreich, R. S. Malayapa J, Merritt, W. F. Pickard, Vijayalaxmi, "Cell phones and cancer: what is the evidence for a connection?", Radiat. Res. Vol. 151, pp.513~531, 1999.
- [12] Belpomme D., Irigaray P., Hardell L. Clapp R., Montagnier L., Epstein S., Sasco A. J., "The multitude and diversity of environmental carcinogens", Environ. Res. Vol.105, pp.414~429, 2007.
- [13] Bionitiative Report: A Rationale for a Biologically based Public Exposure Standard for Electromagnetic Fields (ELF and RF), <http://www.bionitiative.org>(assessed November 19, 2007).
- [14] D. Belpomme, P. Irigaray, L. Hardell, "Electromagnetic fields as cancer causing agents", Environ. Res. Vol.107, pp.289~290, 2008.
- [15] Hiles M, "Magnetic field interference-technology, economics and politics", Power Quality ASSURANCE, Vol.8, No.4, pp.84~90, 1997.
- [16] Austin S., "Electromagnetic interference in buildings", Building Services, London:CBSE, pp.55~56, September 1991.
- [17] Brommley K., Wylds S., "Magnetic fields in buildings", Building Services, London:CBSE, pp.37, December 1994.
- [18] M. Sandstrom, K.H. Mild, A. Bergland, "External power frequency magnetic field induced jitter on computer monitors", Behaviour and Information Technology, Vol.12, No.6, pp.359~363, 1993.
- [19] R. S. Baishiki and D. W. Deno, "Interference from 60(Hz) electric and magnetic fields on personal computers", IEEE Transaction on Power Delivery PWRD-2,2, PP.558~563, 1987.
- [20] Ronald W.P.King, "The electromagnetic field of a horizontal electric dipole in the presence of a three-layered region", J.Appl.Phys. Vol.89, No.12, PP.7987~7995, 1991.
- [21] 이영식, 박정은, 강대하, "전력선로 근방의 전자파 전자기계 계산", 한국조명.전기설비학회, Vol.22, No.6, pp.79~88, 2008.
- [22] Ronald W.P. King, Tai T. Wu, "The complete electromagnetic field of a three-phase transmission line over the earth and its interaction with the human body", J.Appl.Phys. Vol.78, No.2, PP.668~683, 1995.

◇ 저자소개 ◇

강대하 (姜大夏)

1948년 12월 17일생. 1975년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1990년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1980년~현재 부경대학교 전기 제어공학부 교수.
Tel : (051)629-6311
Fax : (051)629-6305
E-mail : daeha@pknu.ac.kr

이영식 (李永植)

1962년 7월 31일생. 1994년 부경대학교 공대 전기공학과 졸업. 2003년 부경대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년~현재 부경대학교 대학원 전기공학과(박사과정).
Tel : (051)610-0525
Fax : (051)610-0505
E-mail : leeys731@hanmail.net

김부규 (金釜圭)

1974년 2월 7일생. 2002년 방송통신대 졸업. 2005년 부경대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사).
Tel : (051)520-2272
Fax : (051)520-2279
E-mail : vogue@keco.co.kr