

송전선로 주변의 3차원 자기장 계산 및 elliptical 특성

명성호*, 김상범**, 신구용**, 이동일**
*한국전기연구원, **전력연구원

ELF 3D Magnetic Field Calculation and Elliptical Characteristic around Transmission Lines

Myung Sung Ho*, Kim Sang Beom**, Shin Koo Yong**, Lee Dong IL**
KERI*, KEPRI**

Abstract - 본 논문에서는 극저주파 전자계 장애의 공학적 평가에 있어 기본이 되는 송전선 주변의 3차원 자기장 예측기법에 대하여 기술하였다. 송전선 주변의 무한영역 극저주파 자기장 계산을 위해서는 Biot-Savart's law에 의한 3차원 자기장 해석방법을 사용하였으며 교류자계 벡터의 중요한 파라미터인 elliptical polarized 특성에 대하여도 고찰하였다.

1. 서 론

최근 전자계에 관해 연구하는 학자들은 전계보다는 주로 자계가 생체 안전에 영향을 미친다는 사실을 밝혀내고 있다. 간단히 이유를 설명하자면, 인체와 공기에서의 conductivity(σ) 차이는 order가 10^4 정도의 차이가 있지만, 인체는 기본적으로 nonmagnetic이므로 permittivity (μ)의 차이는 거의 없다. 그러므로, 자계는 크기의 변화 없이 인체를 그냥 투과한다는 것을 알 수 있다. 또한 자계는 전계보다 차폐(Shielding)이 어렵기 때문에 이에 대한 영향을 피하기 어렵다. 이에 따라 미국 등 선진 각국에서는 'Prudent Avoidance'(현명한 회피) 정책아래 전자계(EMF) 노출량 실태파악, EMF 인체 영향 및 저감 기술을 중심으로 집중적인 연구활동을 수행하고 있다. 우리나라에서도 극저주파 전자계장해가 사회적인 환경 문제로 대두되어 집단적으로 민원이 발생하고 있으나, 아직까지는 전자계장해 및 실태에 관한 구체적인 조사, 연구 자료가 부족하여 국민들의 염려를 해소시켜 주지 못하는 물론 사회적으로도 큰 환경비용 발생이 우려되고 있는 상황이다. 이에 본 논문에서는 전력설비 주변의 무한영역자기장 계산에 많이 이용되는 Biot-Savart's law에 의한 3차원 자기장 해석 방법에 대하여 다루고자 한다.

2. 3차원 자기장 계산 방법

2.1 Biot-Savart's law 해석식을 사용한 자계 해석

자계 계산의 기본은 Biot-Savart 법칙의 적용이다. 그림 1과 같이 아주 작은 전류소 $i d\vec{l}$ 로부터 r 만큼 떨어진 지점 P 에서의 자기장 $d\vec{B}$ 는 다음 식(1)과 같으며, 그림 1과 같이 유한 직선 전선 $i d\vec{l}$ 에 의한 자기장은 식(2)의 적분으로 얻어지며 그 결과는 식(3)과 같다.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (1)$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{\rho dz \vec{u}_z}{(\rho^2 + z^2)^{3/2}} \quad (2)$$

$$B = \frac{\mu_0 i}{4\pi \rho} (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) \quad (3)$$

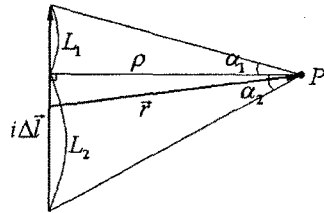


그림 1. $i d\vec{l}$ 에 의해 나타나는 자기장의 계산

2.2 3차원 교류 자계의 파라미터

공간의 어떤 점에서 3 차원 교류자계 벡터 B 의 일반식은 각 축간의 위상차를 고려하고 단일 주파수를 가정한 경우 다음과 같이 표현된다.

$$B(t) = \sqrt{2} B_x \sin(\omega t) \mathbf{i} + \sqrt{2} B_y \sin(\omega t + \alpha) \mathbf{j} + \sqrt{2} B_z \sin(\omega t + \beta) \mathbf{k} \quad (4)$$

3 차원 자계(각 축 성분이 0이 아닌 경우)에서는 $\alpha = \beta = 0$ 일 때, 직선자계로 되고, 다른 조건에서는 타원자계 또는 원자계로 된다. 또 각 시간에서의 자계 벡터 B 의 방향벡터 e 는 다음과 같이 주어진다.

$$e(e_x, e_y, e_z) = e \{ B_x \sin(\omega t), B_y \sin(\omega t + \alpha), B_z \sin(\omega t + \beta) \} \quad (5)$$

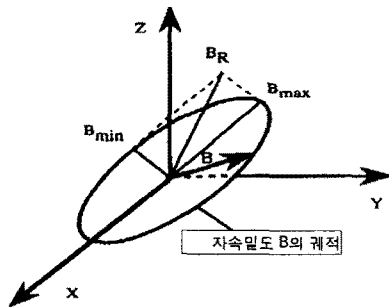


그림 2. 공간 임의점에서의 자계벡터의 궤적

자계 B 의 실효치 B_{rms} 는 B 의 내적의 1 주기 T ($=1/f = 2\pi/\omega$)에 대한 평균으로 다음과 같다.

$$B_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} B \cdot B dt} = \sqrt{\frac{\omega}{2} \pi \int_{-\pi/\omega}^{\pi/\omega} B \cdot B dt} = \sqrt{\omega \pi \int_{-\pi/\omega}^{\pi/\omega} \{ B_x^2 \sin^2 \omega t + B_y^2 \sin^2(\omega t + \alpha) + B_z^2 \sin^2(\omega t + \beta) \} dt} \quad (6)$$

식(6)을 풀면 구하는 3차원 자기벡터 B 의 실효치 B_{rms} 는 다음과 같이 주어지게 된다.

$$B_{rms} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (7)$$

IEEE Standard에서는 각 축 자기 성분의 실효치의 2승의 합의 평방근을 Resultant 자기(합성자기) B_R 로서 정의하고 있고, 식(8)로 나타낸 3차원 자기벡터 B 의 실효치의 정의와 같게 된다.

$$B_R = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (8)$$

이와 같이 B_R 는 각 축 간의 위상차에 의하지 않고 자계의 각 축 성분의 실효치에 의해서만 결정된다. 이것은 B_R 의 측정에서는 각 축의 위상차에 관한 정보(또는 회전 자계를 특징짓는 파라메타)를 얻을 수 없음을 나타낸다. 다음 그림 3은 교류 타원자계의 파라메타를 나타낸 것이다.

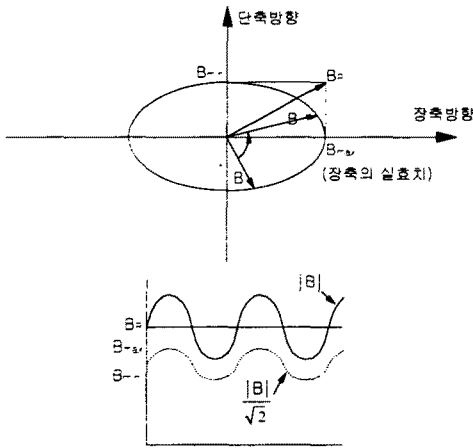


그림 3. 교류 타원자계의 파라메타

2.3 3차원 교류 자계의 최대 및 최소

3차원 자기 벡터 B 의 크기 $|B|$ 가 최대 또는 최소 조건은 다음 식(9)와 같다.

$$\frac{d|B|}{dt} = 0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} |B| &= \sqrt{B \cdot B} \\ &= \sqrt{2B_x^2 \sin^2 \omega t + 2B_y^2 \sin^2(\omega t + \alpha) + 2B_z^2 \sin^2(\omega t + \beta)} \\ &= \sqrt{(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2) - \{(B_x^2 + B_y^2 \cos 2\alpha + B_z^2 \cos 2\beta) \cos 2\omega t \\ &\quad - (B_x^2 \sin 2\alpha + B_z^2 \sin 2\beta) \sin 2\omega t\}} \end{aligned} \quad (10)$$

여기에서

$$P(t) = (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2) - \{(B_x^2 + B_y^2 \cos 2\alpha + B_z^2 \cos 2\beta) \cos 2\omega t - (B_x^2 \sin 2\alpha + B_z^2 \sin 2\beta) \sin 2\omega t\} \quad (11)$$

로 가정하면, $|B|$ 의 최대·최소를 부여하는 식(9)의 조건은 식(12)와 같이 된다.

$$\frac{d|B|}{dt} = 0 \Leftrightarrow \frac{dP(t)}{2\sqrt{P(t)}} = 0 \Leftrightarrow \frac{dP(t)}{dt} = 0 \quad (12)$$

여기에서 U, V 를 다음과 같이 정의하면, 식(13)과 같이 되므로 이 식을 만족시키는 조건은 식(14)와 같이 된다.

$$U = B_x^2 + B_y^2 \cos 2\alpha + B_z^2 \cos 2\beta$$

$$V = B_x^2 \sin 2\alpha + B_z^2 \sin 2\beta$$

$$\frac{d|B|}{dt} = 0 \Leftrightarrow \sqrt{U^2 + V^2} \sin(2\omega t + \delta) = 0$$

$$\tan \delta = V/U \quad (13)$$

$$2\omega t + \delta = \pi \text{ 또는 } 2\omega t + \delta = 0 \quad (14)$$

IEEE Standard에서는 이들의 값에 관계하는 파라메타를 최대자기 B_{max} 및 최소자기 B_{min} 로 정의하고 있으며 B_{max}, B_{min} 및 B_R 의 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$B_R = \sqrt{B_{max}^2 + B_{min}^2} \quad (15)$$

3. 송전선 주변의 3차원 자기장 해석 예

그림 4는 방향을 고려하여 송전선로 주변의 자계를 해석하기 위한 765kV 송전선로의 평면배치도이며, 그림 5는 이도를 고려한 765kV 송전선로의 최저 지상고를 기준으로 한 측면 배치도이다. 또한, 그림 6은 첩탑 2에서의 765kV 송전선로의 단면 구조도이다. 그리고 본 사례 연구에서는 송전선로 인접주변에 자기장을 평가해야 하는 영역에 있다고 가정하며 765kV 송전선의 부하전류는 1600A로 설정하였다.

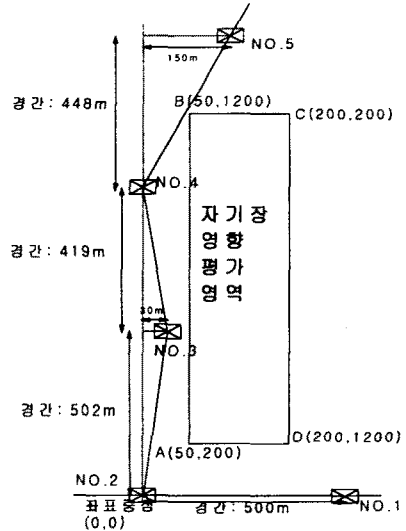


그림 4. 765kV 송전선로 평면배치도

본 연구에서 3차원 자기장 해석시에 송전선로가 이도 점을 기준으로 포물선을 그리기 때문에 한 경간의 포물선을 100개의 유한 선로로 선형화하였으며 이도 계산을 위한 수평장력/선로 1m당 kg 무게 = 1953으로 설정하였다.

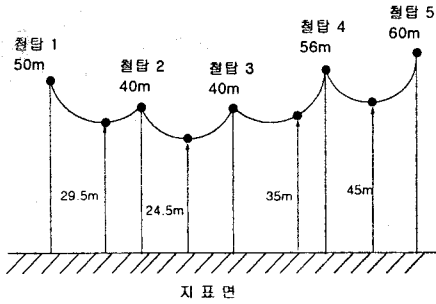


그림 5. 765kV 송전선로 지표면위 측면배치도

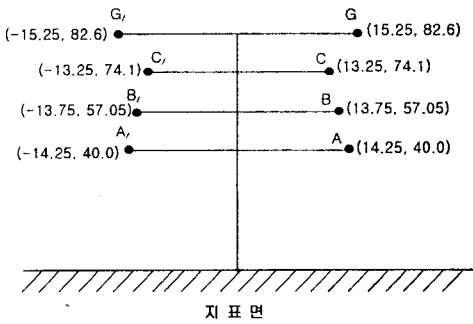


그림 6. 철탑 2에서의 송전선로 단면 구조도

계산 결과 그림 7에 평가해야 하는 영역의 자기장 분포도를 나타내었다.

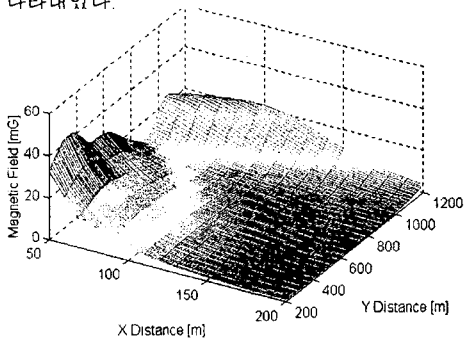
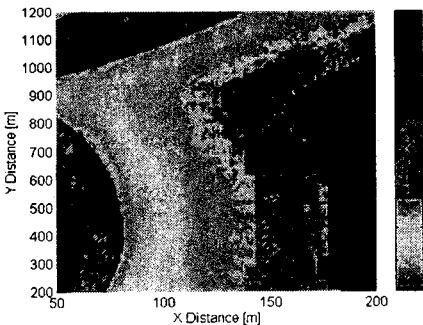


그림 7. 평가 영역의 자기장 분포도



한편, 그림 4의 A점과 C점에서 3차원 교류자기 벡터 B의 궤적을 그리면 그림 8 및 그림 9와 같이 앞에서 설명한 것처럼 회전 자계를 나타낼 수 있었다.

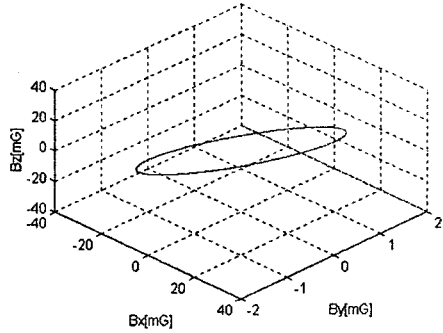


그림 8. A지점에서의 회전자기 벡터 B의 궤적

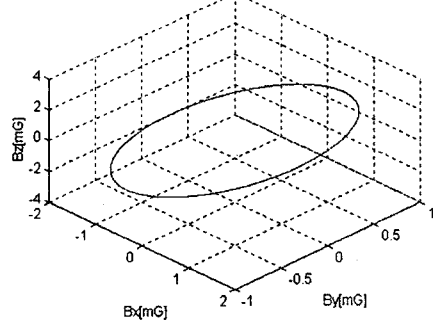


그림 9. C지점에서의 회전자기 벡터 B의 궤적

4. 결 론

본 논문에서는 극저주파 전자계 장애의 공학적 평가에 있어 기본이 되는 송전선 주변의 3차원 자기장 예측기법에 대하여 논하였다. 여기에서는 송전선 주변의 무한영역 극저주파 자기장 계산을 위해서 Biot-Savart's law에 의한 3차원 자기장 해석방법을 사용하였으며 교류자기 벡터의 중요한 파라미터인 elliptical polarized 특성에 대하여도 고찰하였다. 또한, 적용 예로써 방향과 이도를 고려하여 1600A급 765kV 송전선로의 주변의 자기장 분포를 계산하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] T. Takuma, 數値電界 計算法, 1980, Corona.
- [2] Electric Power Research Institute, Transmission Line Reference Book 345 kV and Above, 2nd Ed. chap. 8, (1982).
- [3] Charles Polk, Elliot Postow, "Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields", CRC Press
- [4] Matthew, N. O. Sadiku, "Numerical Techniques in Electromagnetics", CRC Press
- [5] Z. Yan, B. L. Qin, X. Lin, R. Y. Weng, G. Gela "Calculation and measurement of field parameters during live-line maintenance," IEEE Trans. on PWRD, vol. 6, no. 3, pp. 1187-1191, July, 1991.
- [6] Sung Ho Myung, "Analysis of magnetic field distribution around electric power facilities", CRIEPI/KEPRI/KERI Joint Workshop on Electric & Magnetic Field Effects, May 26-27 (1999).
- [7] ICNIRP, " Guidelines On limiting Exposure to Non-Ionizing Radiation", Reference Book, (1999).