

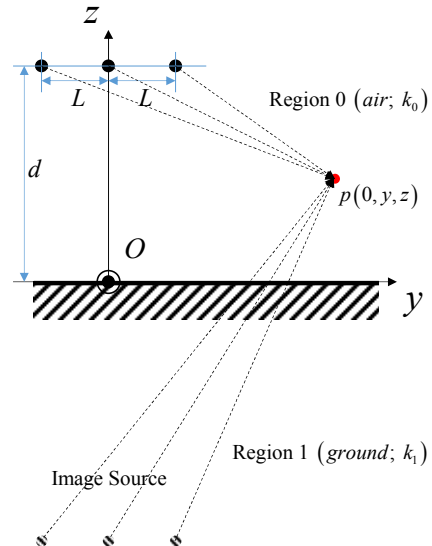
초고전압 극 저주파 송전선하에서 발생하는 전기자기장의 분석적 해석

이재중*, 정용식**
 서울대학교*, 광운대학교**

Analytic Solutions of Electric and Magnetic Fields under Power Transmission Line at Extremely Low Frequency

Jae-Joong Lee*, Young-seek Chung**
 Seoul National University*, Kwangwoon University**

Abstract - 송전선로 아래에서의 전기장과 자기장의 계산은 2013년 밀양 송전탑 사건에서 볼 수 있듯이 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 공간을 전파해 나가는 전자파의 특성과는 다르게 5~60Hz의 매우 낮은 주파수(ELF: Extremely Low Frequency)로 송전을 하는 송전선로에서는 발생원으로부터 거리에 따라 반비례하여 그 크기가 작아지는 정전기장 및 정자기장을 발생시킨다. 하지만 수백 kV의 높은 송전전압 때문에 주변에서의 전기장 자기장의 값이 매우 크게 되고 이로 인한 논란이 많기 때문에 정확한 정량적 해석이 불가피한 실정이다. 본 논문에서는 수백 kV로 송전되는 송전선로에서 발생 하는 전기장과 자기장을 해석적으로 계산하고 지면으로부터 특정한 높이에 따라 전기장 자기장이 어떻게 변화 하는지에 대한 결과를 분석 하였다. 송전 선하에 전기장 및 자기장의 분포는 MATLAB을 통해서 계산 되었다.



<그림 1> 송전선로의 단면도 와 그 영상효과

이때 하나의 송전선로에 의하여 생긴 전류밀도는 수식 (1) 과 같이 정의 할 수 있다.

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}) = e^{iyx} \delta(y) \delta(z-d) \hat{x} \quad (1)$$

수식 (1)의 전류 밀도를 기반으로 맥스웰 방정식을 만족 시키는 전기장과 자기장의 적분 방정식 관계를 풀게 되면 x=0인 평면에서의 전기장과 자기장의 각각 x,y,z 성분을 구할 수 있게 된다[5]. 이때 각각의 방정식은 다음과 같다.

$$E_x(\mathbf{r})|_{x=0} = \frac{j\omega\mu_0 l}{\pi k_1^2} \left[k_0 d \sum_{i=1}^3 e^{(i-2)\frac{2}{3}\pi} \frac{(z+d)^2 - (y+(i-2)L)^2}{((z+d)^2 + (y+(i-2)L)^2)^2} \right] \quad (2)$$

$$E_y(\mathbf{r})|_{x=0} = \frac{j\omega\mu_0 l}{2\pi k_0} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^3 e^{(i-2)\frac{2}{3}\pi} (y-(i-2)L)}{\frac{1}{(z-d)^2 + (y+(i-2)L)^2}} \times \frac{1-2k_0^2/k_1^2}{((z+d)^2 + (y+(i-2)L)^2)} \right\} \quad (3)$$

$$E_z(\mathbf{r})|_{x=0} = \frac{\omega\mu_0 l}{2\pi k_0} \left[\sum_{i=1}^3 e^{(i-2)\frac{2}{3}\pi} \left\{ \frac{z-d}{(z-d)^2 + (y+(i-2)L)^2} - \frac{z+d}{(z+d)^2 + (y+(i-2)L)^2} \right\} \right] \quad (4)$$

1. 서 론

송전선로는 송전 손실을 줄이기 위해 고전압을 이용하여 송전한다. 더욱이 1980년대 이후 급격한 경제성장에 따라 전력 수요량이 기하급수적으로 늘어나고 있는 추세이다. 이 수요에 대한 공급을 맞추기 위해 효율이 좋은 원자력 발전을 많이 이용 하는데, 원자력 에너지의 특성 상 바닷가 근처에 건설이 되어 내륙으로 송전을 하게 된다. 이에 따른 초고압 송전선로의 건설은 불가피한 실정이며, 세계 보건기구(WHO) 등 많은 기구에서 전기 자기장의 노출량에 따른 인체의 영향에 대한 보고서 등 저주파수 전기장 및 자기장에 대한 영향과 이에 대한 가이드라인을 제시하고 있다[1][2]. 60Hz로 전달되는 극 저주파는 전기장과 자기장을 발생하며 파동성 보다는 정적인 특징이 큰 주파수이다. 그렇기 때문에 초고압 송전선로 근처에서는 이 정적인 주파수들의 영향이 보다 크고 두드러지게 나타난다. 특히 최근 송전전압이 점점 상승하는 추세이며 국내에는 765kV, 중국에서는 1000kV까지 송전 전압이 상승한 상황이다.

많은 가공 송전선로는 단일 전선을 이용하여 송전을 하지 않으며 상(phase)을 잘 맞추어 전력 손실이 최대한 적게 일어나도록 하고 있다. 따라서 본 논문에서 해석하는 송전선로는 3상 전송선로(3-phase transmission line)를 대상으로 하며 전송선이 직선선로라고 가정한다. 실제 송전선로는 전송선로의 무게 때문에 아래로 처지는 이도(Dip)현상이 발생하게 되는데 본 논문에서는 이러한 이도 현상을 반영하기 위해 기준 단면에 대해서 해석을 진행 하고 이도가 커질수록 지표면과의 거리가 가까워지는 점을 이용하여 이도 현상을 반영하였다.

2. 본 론

2.1 Formulation

전송선은 송전탑에 설치가 되며 여러 개의 송전선로가 전송 손실을 최소화하기 위해 다양한 형태로 배치되어 있다[3]. 여러 가지 배열 중 수평 방향으로 평행하게 배열 된 3개의 전송선로에 대해서 해석을 한다. 3개의 전송선로는 각각 120도의 위상차를 갖고, 기준 좌표계에서 각각 L만큼 떨어진 만큼 거리에 위치한다. 이 성질을 이용하여 단일 선로 해석을 한 결과에 중첩의 원리(Superposition Theorem)와 상대 위치를 대입해서 전송선로 효과를 계산 해 낼 수 있다. 또한 지구는 보통 무한 커패시터라고 가정하기 때문에 송전선하의 지표는 접지(Ground)라고 가정하였으며 그에 대한 영상효과 역시 적용해서 계산 하였다[4]. 그림 1에서는 해석 하고자 하는 송전선로의 단면도와 그에 대한 영상효과를 보여주고 있다.

중앙의 선로는 y=0 평면에 위치하고 있으며, 양쪽에 각각의 선로는 중앙으로부터 L만큼 떨어져 있는 거리에 위치한다. 또한 이 세 개의 선로는 지표면으로부터 d만큼 떨어져 있는 높이에 위치한다.

$$B_x(r)|_{x=0} = -\frac{2j\mu l k_0}{\pi k_1^2} \left[\sum_{i=1}^3 e^{(i-2)\frac{2}{3}\pi} \frac{(y+(i-2)L)(z+d)}{\left((z+d)^2+(y+(i-2)L)^2\right)} \right] \quad (5)$$

$$B_y(r)|_{x=0} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \sum_{i=1}^3 e^{(i-2)\frac{2}{3}\pi} \times \left\{ \begin{aligned} & \frac{4(z+d)k_0 d}{k_1^2 \left((z+d)^2 + (y+(i-2)L)^2 \right)} \\ & \times \left[1 - \frac{2 \left[(z+d)^2 - (y+(i-2)L)^2 \right]}{(z+d)^2 + (y+(i-2)L)^2} \right] \\ & - \frac{z-d}{(z-d)^2 + (y+(i-2)L)^2} \\ & + \frac{z+d}{(z+d)^2 + (y+(i-2)L)^2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$B_z(r)|_{x=0} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \sum_{i=1}^3 e^{(i-2)\frac{2}{3}\pi} \left\{ \begin{aligned} & \frac{(y+(i-2)L)}{(z-d)^2 + (y+(i-2)L)^2} \\ & - \frac{(y+(i-2)L)(1-2k_0^2/k_1^2)}{(z+d)^2 + (y+(i-2)L)^2} \\ & + \frac{4(y+(i-2)L)(k_0 d)}{k_1^2 \left((z+d)^2 + (y+(i-2)L)^2 \right)} \\ & \times \left[1 + \frac{2 \left[(z+d)^2 - (y+(i-2)L)^2 \right]}{(z+d)^2 + (y+(i-2)L)^2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

위의 식 (2)-(7)이 $x = 0$ 평면에서의 y 와 z 에 대한 각각의 전기장과 자기장의 수식이 되며, z 를 변경시키는 것이 지표면과의 거리를 변화시키는 것이기 때문에 송전탑에서부터 가장 이도가 큰 지점까지 변하는 전기장과 자기장을 z 를 증가시켜 가면서 계산한 결과로 볼 수 있다. 765kV 송전선로는 최대 10m까지의 이도가 발생하는 걸로 알려져 있다.

2.2 Calculation Results

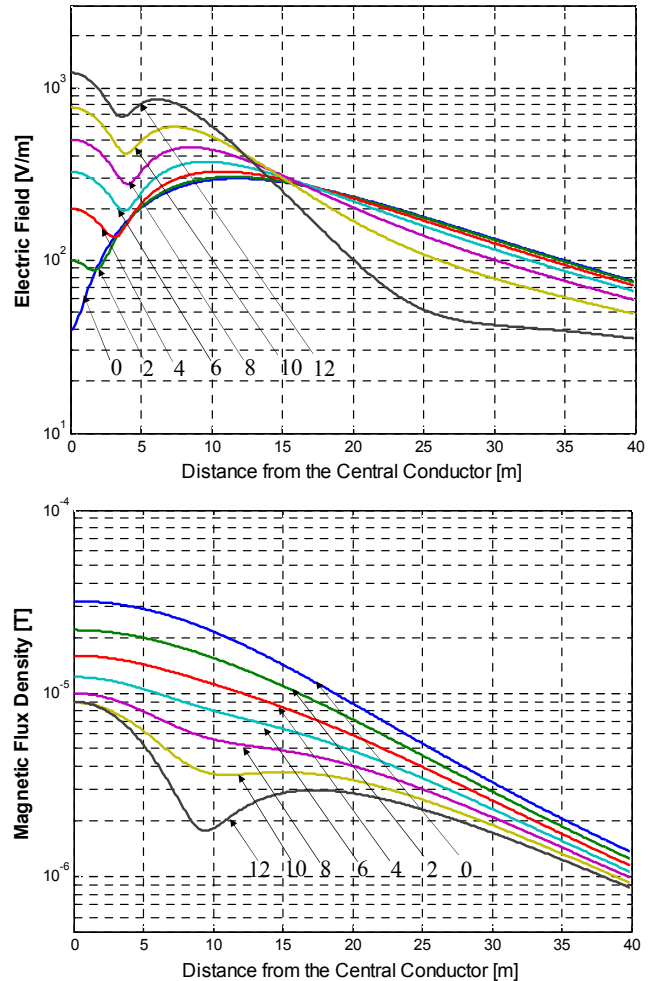
위에서 제시한 수식을 통해 전기장과 자기장을 지표면에서 각각 0,2,4,6,8,10,12m 떨어진 곳에서 계산한다. 이는 송전탑 바로 아래에서부터 이도가 일어날 수 있는 가장 큰 범위 까지 전기장 및 자기장이 어떻게 변화 하는지를 알아보기 위함이다. 3개의 전송선로는 각각 3m 씩 떨어져 있으며, 지상으로부터의 거리는 20m로 설정하였다.

그림 3에는 송전탑에서부터 거리에 따라 발생된 전기장과 자기장을 도시하고 있다. 이때 전기장과 자기장은 앞서 제시한 수식들의 x, y, z 성분들의 2-norm을 이용하여 전체 크기를 도시 하였으며, 전기장과 자기장이 거리가 멀어질수록 전반적으로 감소하는 특성을 보여준다. 하지만 지표면과의 거리에 따라서 감소하는 속도가 각기 다른 결과가 나타나는데 이는 기존의 연구결과와 일치한다[5].

또한 본 수식에서 사용되는 파수(wavenumber)는 공기층(region 0)과 지표면(region 1)에서 각기 다르며, 그에 따른 유전율 역시 다른데 이에 대한 정보는 참고문헌 [6]에서 주파수에 따른 복소유전율 값을 참조 하였다.

3. 결 론

송전선로에서 발생하는 초고전압 급 저주파 전자기장은 송전선압이 높아질수록, 특히 도심 지역이나 인근 학교, 시설물 등을 지나가는 경우에 더욱 민감한 문제로 작용한다. 때문에 이러한 설비 시설에서 발생하는 전자기장에 대한 예측은 분쟁을 해결하거나 다른 송전시설을 건설 할 때 중요한 지표가 된다. 본 논문에서는 송전선하에서 발생하는 전기장과 자기장을 분석적으로 계산하여 그 개형을 예측 해 냈고, 그 결과는 기존의 연구 및 측정 데이터들과 유사한 패턴을 보여주며, 이는 수식의 계산 결과가 정성적으로 유의미함을 의미한다.



〈그림 3〉 송전탑에서 거리에 따른 전기장과 자기장 분포

또한 이도에 대한 영향을 별 다른 수식 전개 없이 측정 포인트의 변경으로 예측하여 계산 하였다. 앞으로 논문의 수식을 개선하여 이도를 반영한 수식으로 확장 해 나갈 수 있을 것이며, 송전선하에서 발생하는 전자기장에 대한 3차원 해석 연구에 도움이 될 것으로 사료된다.

[감사의 글]

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2014년 선정 기초연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임. (과제번호 : R14XA02-17)

[참고 문헌]

- [1] Health Physics, Vol. 58, No. 1, pp. 113-122
- [2] 황종선, 이달형, 김영조, 이상진, 김재준, “극저주파 전자계에 대한 WHO의 건강영향평가 고찰”, 대한전기학회 전기설비전문위원회 춘계학술대회 논문집, 2009
- [3] George Filippopoulos, Dimitris Tsanakas, “Analytical Calculation of the Magnetic Field Produced by Electric Power Lines”, Power Delivery, IEEE Transactions, Vol 20, pp. 1474-1482, 2005
- [4] J.R. Reitz, F. J. Milford, “Foundations of electromagnetic theory”, Addison-Wesley, U. S. A., pages 56-76
- [5] Manash Jyoti Baishya, Satyajit Bhuyan, N.K.Kishore, “Calculation of Electric and Magnetic Field under AC Transmission and Distribution Lines in Guwahati City”, ADBU-Journal of Engineering Technology, Vol. 1, pp1-5, 2014
- [6] Liu, Ning, “Soil and Site Characterization Using Electromagnetic Waves”, Ph.D. Degree Thesis, 2007