

가공송전선로의 소도체 구성방식에 따른 전기적 특성 해석

정연호, 손홍관, 이형관, 조연규, 신복덕
한국전기연구소 전력계통연구부

An Analysis of Electrical Characteristics for Bundled Conductor Configurations in Overhead Transmission Lines.

Y.H.Jeong, H.K.Sohn, H.K.Lee, Y.K.Cho, B.D.Sin
Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

Abstract - Compacting of Overhead power transmission lines can be helpful in solving many problems, such as reduction of land and forest losses, decrease of the line's environmental impact zones, improvement of its electrical performance. And in overhead transmission lines, regular polygon configuration of bundled conductors are considered and adopted.

This papers are compared to subconductor surface charges and electric field gradients, line parameters, natural capacities for regular polygon and modified configurations in 345kV 4 bundle 2 circuits horizontal type transmission lines.

1. 서 론

전력수요의 지속적인 증가에 따라 다도체 방식의 초고압 송전선로의 건설이 점점 확대되고 있다. 그러나 선로 주변의 민원에 의해 선하지 확보가 점점 어려워지고, 선로의 초고압, 다도체화, 대형화에 따른 환경훼손 및 건설비용이 매우 증가되어 이를 개선하기 위한 대책이 필요한 실정이다. 또한 송전선로의 초고압화에 의해 선로 주변의 전기환경 뿐만 아니라 주어진 선로를 이용하여 최대한의 전력을 송전할 수 있도록 하기 위한 대책도 필요한 실정이다.

한편 다도체 송전방식에서 소도체의 배열은 정다각형으로 적용하는 것이 일반화되어 있는데, 이 경우 3상이 기하학적인 대칭구조를 하고 있기 때문에 각 소도체 표면의 전하밀도는 등분포하지 않게 된다. 최근에는 소도체 배열을 재구성하여 이를 완화시킴으로서 송전용량 및 전기적 특성을 개선하고자 하는 연구가 일부에서 발표되고 있다. 이 때 소도체의 배열은 각 소도체 표면에서의 전하밀도와 최대표면전계강도가 가능한 한 균등하게 되도록 함으로서 선로 주변 전기환경의 개선, 고유송전용량의 증대와 같은 전기적인 특성을 개선하는 효과를 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있다.

본 논문에서는 효율적인 전력수송과 선로의 전기환경을 개선하기 위해 다도체 송전선로의 소도체 배열을 재구성하여 전기적 특성 및 선로 주변의 전자계분포, 선로정수에 의한 고유송전용량을 분석하였다. 이러한 결과에 의해 송전선로의 최적설계가 가능할 것으로 기대된다.

2. 전하밀도 및 전자계강도의 계산

2.1 소도체의 전하밀도 계산^{[1][2][3][4]}

전하밀도[Q]는 전위[V]와 Maxwell 전위계수의 행렬 [p]의 방정식에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$[V] = [p] \cdot [Q] \quad [V] \quad (1)$$

$$[Q] = [p]^{-1} \cdot [V] \quad [C/m] \quad (2)$$

여기서 전위계수 행렬 [p]는

$$p_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{2y_i}{r_i}\right) \quad (3)$$

$$p_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{l'_{ij}}{l_{ij}}\right) \quad (4)$$

$$= \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\sqrt{\frac{(x_i-x_j)^2+(y_i+y_j)^2}{(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2}}$$

단, $P_{ij} = P_{ji}$, $P_{ij} > 0$, $-P_{ij} > P_{ij} (i \neq j)$

여기서, r_i : i 도체의 반경

x_i, y_i, x_j, y_j : i, j 도체의 좌표

l'_{ij} : i 도체와 j 도체 image 사이의 거리

l_{ij} : i 도체와 j 도체의 거리

2.2 소도체 주변의 전계강도 계산^{[1][2][3]}

전하가 각 소도체의 중심에 집중되어 있는 것으로 가정할 때 도체 i 의 전하 Q_i 에 의한 임의의 한 점(x, y)에서의 전계강도는 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{E}_i = E_{x,i} \cdot \vec{u}_x + E_{y,i} \cdot \vec{u}_y \quad [V/m] \quad (5)$$

여기서, \vec{u}_x, \vec{u}_y 는 수평축과 수직축에 대한 단위벡터.

$$E_{x,i} = \frac{Q_i \cdot (x-x_i)}{2\pi\epsilon[(x_i-x)^2+(y_i-y)^2]} - \frac{Q_i \cdot (x-x_j)}{2\pi\epsilon[(x_i-x)^2+(y_i+y)^2]} \quad (6)$$

$$E_{y,i} = \frac{Q_i \cdot (y-y_j)}{2\pi\epsilon[(x_i-x)^2+(y_i-y)^2]} - \frac{Q_i \cdot (y+y_j)}{2\pi\epsilon[(x_i-x)^2+(y_i+y)^2]} \quad (7)$$

따라서 임의의 한 점(x, y)에서 도체 1, 2, ..., n 에 의한 전계의 수평성분과 수직성분은 다음과 같이 된다.

$$E_x = E_{x,1} + E_{x,2} + \dots + E_{x,n} \quad (8)$$

$$E_y = E_{y,1} + E_{y,2} + \dots + E_{y,n} \quad (9)$$

식 (5)-(9)를 이용하여 소도체 표면의 전계강도를 구하거나 지상에서의 전계강도를 구할 수 있다.

2.3 소도체 주변의 자계강도 계산

전류 I_i 가 흐르는 무한 도체 i 에서 거리 R 만큼 떨어진 임의의 한 점(x, y)에서의 자속밀도는 식(10)으로 표현할 수 있다.

$$\vec{B}_i = B_{x,i} \cdot \vec{u}_x + B_{y,i} \cdot \vec{u}_y = \frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \cdot \frac{1}{R} [T] \quad (10)$$

여기서, $R = \sqrt{(x_i-x)^2+(y_i-y)^2}$

$$B_{x,i} = \frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \cdot \frac{y_i-y}{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2} \quad (11)$$

$$B_{y,i} = \frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \cdot \frac{x-x_i}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \quad (12)$$

따라서 임의의 한 점(x, y)에서 도체 1, 2, ..., n 에 의 한 자계의 수평성분과 수직성분은 다음과 같이 된다.

$$B_x = B_{x,1} + B_{x,2} + \dots + B_{x,n} \quad (13)$$

$$B_y = B_{y,1} + B_{y,2} + \dots + B_{y,n} \quad (14)$$

3. 선로정수 및 임피던스 산정

선로의 커패시턴스는 식(2) 전위계수의 역수를 취함 으로서 용량계수 [q]를 다음과 같이 구할 수 있으며,

$$[Q] = [p]^{-1} \cdot [V] \quad [C/m] \quad (15)$$

$$= [q] \cdot [V] \quad (15)$$

$$[q] = [p]^{-1} \quad (16)$$

이 용량계수에 의해 정전용량 [C]는 다음과 같다.

$$C_i = q_{i,1} + q_{i,2} + \dots + q_{i,n} \quad [F/m] \quad (17)$$

$$C_{i,j}(i \neq j) = C_{j,i} = -q_{i,j} \quad [F/m] \quad (18)$$

한편 선로 주변 대기에 대한 매질이 $\epsilon_0, \mu_0, \sigma$ 로 일정한 경우 선로의 인덕턴스 및 콘덕턴스는 정전용량으로 부터 다음과 같이 계산된다.

$$[L] = \mu_0 \epsilon_0 [C]^{-1} \quad [H/m] \quad (19)$$

$$[G] = \mu_0 \sigma [L]^{-1} \quad [mho/m] \quad (20)$$

$$= \frac{\sigma}{\epsilon} [C]$$

따라서 선로 임피던스 및 어드미턴스와 써지임피던스는 다음과 같이 되고, 선로의 고유송전용량은 써지 임피던스와 반비례의 관계에 있다.

$$Z = [R] + j[L] \quad (21)$$

$$Y = [G] + j[C]$$

$$Z_s = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (22)$$

4. 사례연구

해석에 사용된 계통은 345kV 4도체 2회선방식의 수직배열형 첩탑을 대상으로 하였으며, 해석조건은 그림 1 과 같은 상배열과 각 상의 중심점간 거리 4(m)를 기준으로 하여 정다각형 배열에서 소도체간 거리를 변화시킬 경우와 회선간의 거리를 변화시키는 경우의 써지임피던스 및 송전용량과 전자계분포를 검토하였다. 또한 소도체의 구성을 변경하였을 경우의 써지임피던스 및 송전 용량과 전자계분포를 검토하였다.

표 1은 정다각형 배열의 소도체 간격을 변화시킬 경우의 표면전계강도 및 지상 1[m]에서의 전자계 최대강도를 나타내고 있으며, 표 2는 써지임피던스 및 고유송전용량을 나타내는데 소도체 간격이 커질수록 전기환경 측면에서는 나빠지지만 송전용량은 증대되는 것으로 해석되었다.

표 3 및 4는 기준위치로부터 회선간의 거리를 1[m] 증가 또는 감소시켰을 경우의 해석결과로서 전기환경 측면에서는 회선간의 거리가 가까울수록 양호해지지만 송전 용량 측면에서는 큰 변화는 없는 것으로 해석되었다.

표 5 및 6은 소도체의 구성을 변경시킨 경우의 해석결과로서 한 상의 소도체 구성에서 소도체간 최대거리와 최소거리의 비를 가중치로 줄 때 해석의 경우에는 가중치가 클수록, 즉 소도체가 일정방향으로 집중될수록 소도체 표면의 전기적인 특성은 나빠지지만 지상에서의 전자계강도는 개선되었으며, 송전용량은 가중치가 1.4일 때 가장 큰 것으로 나타났다. 그러나 소도체의 위치 및 간

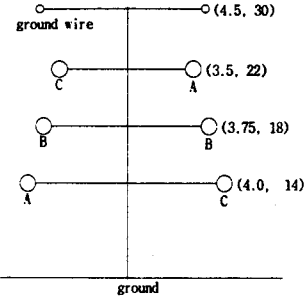


그림 1. 해석에 사용된 기준위치

격을 동시에 변화시키면 고유송전용량이 극대화되는 가중치의 값이 약간씩 변화되고 송전용량의 증가도 바뀌게 된다.

결과적으로 소도체의 구성을 재배치할 경우 도체표면의 전기적인 특성, 즉 코로나 특성은 나빠지지만 지상에서의 전자계분포와 고유송전용량의 측면에서는 개선됨을 알 수 있으며, 도체표면의 코로나특성을 코로나 발생 임계전계강도 부근으로 제한할 경우 선로의 전기적인 특성을 개선할 수 있다고 할 수 있다.

그림 2 및 3에 가중치가 1.0 및 1.4일 경우의 지상 1[m]에서 전계 및 자계분포를 나타냈다.

표 1. 소도체 간격에 따른 전자계특성 비교

소도체간격	표면전계강도[kV/cm]		지상 최대 Field Intensity	
	최대	평균	전계[kV/m]	자계[G/1000A]
300mm	15.03	13.30	1.9624	0.04815
400mm	15.88	14.26	2.1026	0.04815
500mm	16.70	15.08	2.2243	0.04815
600mm	17.49	15.84	2.3330	0.04815

표 2. 소도체 간격에 따른 고유송전용량 비교

소도체간격	Surge Impedance [Ω]	송전용량 [MVA]
300mm	209.59 \angle 356.65°	567.89
400mm	196.50 \angle 356.43°	605.73
500mm	186.31 \angle 356.23°	638.85
600mm	177.95 \angle 356.05°	668.87

표 3. 회선간 거리 변화에 따른 전자계특성 비교

(적용 소도체간격 : 400[mm])

거리	표면전계강도[kV/cm]		지상 최대 Field Intensity	
	최대	평균	전계[kV/m]	자계[G/1000A]
1 m 감소	15.81	14.35	2.0224	0.04380
기준선로	15.88	14.26	2.1026	0.04815
1 m 증가	15.93	14.18		0.05205

표 4. 회선간 거리 변화에 따른 고유송전용량 비교

거리	Surge Impedance [Ω]	송전용량 [MVA]
1 m 감소	196.29 \angle 356.43°	606.37
기준선로	196.50 \angle 356.43°	605.73
1 m 증가	196.63 \angle 356.43°	605.32

표 5. 소도체 위치변화에 따른 전자계특성 비교
(Bundle 직경 : 600[mm])

가중치	표면전계강도 [kV/cm]		지상 최대 Field Intensity	
	최대	평균	전계 [kV/m]	자계 [G/1000A]
1.0	17.49	15.84	2.3330	0.0482
1.2	17.52	15.85	2.3224	0.0479
1.4	17.54	15.85	2.3100	0.0476
1.6	17.55	15.85	2.2967	0.0474
2.0	17.57	15.83	2.2693	0.0471
2.5	17.57	15.79	2.2356	0.0467

표 6. 소도체 위치변화에 따른 고유송전용량 비교

가중치	Surge Impedance [Ω]	송전용량 [MVA]
1.0	177.95 \angle 356.05°	668.87
1.2	177.77 \angle 356.05°	669.54
1.4	177.72 \angle 356.06°	669.73
1.6	177.75 \angle 356.06°	669.62
2.0	177.96 \angle 356.06°	668.83
2.5	178.34 \angle 356.06°	667.40

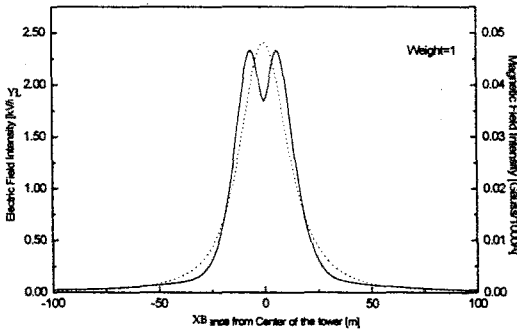


그림 2. 가중치 1.0일때 지상 1[m]에서의 전자계 분포

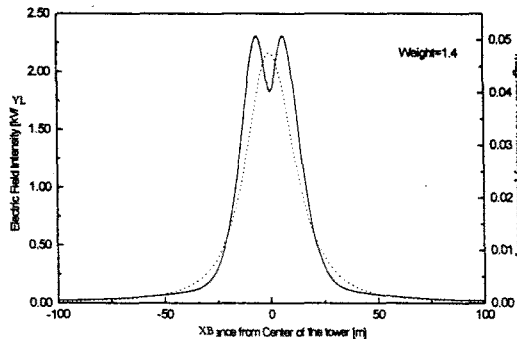


그림 3. 가중치 1.4일때 지상 1[m]에서의 전자계 분포

5. 결 론

이상의 사례연구를 통해 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 소도체의 간격이 커질수록 써지임피던스는 감소하여 고유송전용량은 증대되며, 소도체 표면에서의 최대

전계강도는 증가되었다.

(2) 회선간의 거리가 가까워질수록 써지임피던스는 약간 감소하였지만 큰 변화는 없었다. 그러나 소도체 표면에서의 최대전계강도는 감소하여 코로나 특성은 양호해지는 것으로 해석되었다.

(3) 소도체의 위치변화에 따른 분석에서는 가중치가 1.4일 때 송전용량측면에서 양호한 결과를 나타내었다. 소도체의 위치 및 간격을 동시에 변화시키면 양호한 전기적 특성을 나타내는 가중치 값도 변화되고, 증가되는 용량의 크기도 다르게 나타났다.

결과적으로 소도체의 구성을 재배치할 경우 도체표면의 전기적인 특성, 즉 코로나 특성은 나빠지지만 지상에서의 전자계분포와 고유송전용량의 특성은 개선됨을 알 수 있다.

송전선로의 설계시 도체표면의 코로나특성을 코로나 발생 임계전계강도 부근으로 설계할 경우 선로의 전기적인 특성은 물론 송전용량을 증대시킬 수 있음을 알 수 있었다.

(4) 향후 소도체의 재구성을 최적화하는 알고리즘을 개발하여 최적한 도체의 배치를 찾는 연구가 계속 진행될 예정이고, 이를 배치에 따른 송전용량의 증가를 검토할 계획이다.

(참 고 문 헌)

- [1] "Electrostatic and Electromagnetic Effects of UHV T/L", EPRI EL-802, Project 566, final report, June 1978.
- [2] D.W.Deno, "Calculating Electrostatic Effects of Overhead Transmission Lines", IEEE PES Winter Meeting, T74 086-5, 1974
- [3] IEEE Working Group, E/S and E/M Effects, "Electrostatic Effects of Overhead Transmission Lines, Pt.II - Methods of Calculations", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, No.2, March/April 1972, pp.426-430.
- [4] Clayton R. Paul, "Analysis of Multiconductor Transmission Lines", John Wiley & Sons Inc., 1994.
- [5] "Transmission Line Reference Book", Electric Power Research Institute, 2nd Edition.
- [6] 손흥관, 정연호, 이은용, "다도체 송전선의 소도체 배열에 따른 전자계분포 해석", 1998년 대한전기학회 전기기기연구회 추계 학술발표회 논문집, pp.90-92, 1998.10.24
- [7] "기술용어해설집(송전분야)", 한국전력공사 송변전처, 1984.