

초고압 송전선로의 다도체 구성에 따른 불평형 전류 해석

정 연호, 이 형권, 손 흥관, 조 연구
한국전기연구소

Unbalance Current Analysis on the Bundled Conductors of the UHV Overhead Transmission Line

Y.H. Jeong, H.K. Lee, H.K. Sohn, Y.K. Cho
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - The unbalance current on the bundled conductors of the UHV overhead transmission line is one of the factors affected on power transmission system. It is varied by distance between of bundled conductors and of phase to phase, phase arrangement. In this paper, we calculated unbalance current on the bundled conductors by a variety of line arrangements and also calculated magnetic field at the circumference of the line fed with this unbalance current.

1. 서 론

가공송전선로의 초고압 대전력화에 따라 소도체의 외경은 점차 증가되고 있으며, 번들로 구성되는 다도체의 소도체수도 증가하는 추세에 있다. 이러한 다도체방식 가공송전선로에서는 도체외경 및 상배치 등의 소도체 구성에 의해서 각 소도체에 흐르는 전류의 불평형이 발생되며, 불평형 전류의 변화되는 정도도 차이를 나타낸다.⁽¹⁾⁽²⁾ 송전선로의 비대칭 배열에 의해서 발생하는 불평형 상태는 전력전송에 영향을 끼치는 요인으로 작용하여 전압 및 전류의 역상분과 영상분을 증가시켜 발전기, 모터, 분로리액터, 릴레이 등의 성능에 적지않은 영향을 주고 있다.⁽²⁾⁽³⁾

본 논문에서는 가공송전선로의 소도체 간격과 상배치에 의해 변화되는 불평형 전류를 계산하고, 이 불평형 전류에 의해 상도체 주변에 분포되는 자계를 검토하였다.

2. 전류분포 및 자계분포

2.1 계산식

송전선로에 흐르는 전류를 계산하기 위해서 선로는 그림(2.1)과 같이 직렬 임피던스로 구성되며, 저항성분과 자기 및 상호 리액턴스 행렬로 표현된다. 선로의 길이가 단거리인 모델로 선정하였기 때문에 전류계산에서 V_s 와 V_r 의 위상각은 같은 것으로 가정하였다.

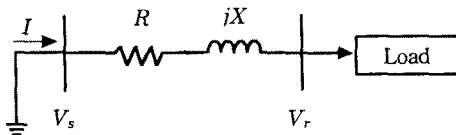


그림 2.1 3상 송전선로의 1상 모델

2.1.1 선로 방정식

그림(2.1)과 같은 선로에서 선로방정식은 식(2.1)과 같이 행렬식으로 구성되며, 복소수의 형태를 취한다.

$$[Z_L][I] = [V_s] - [V_r] \quad \dots(2.1)$$

그리고, 선로에 흐르는 전류를 계산하기 위해 식(2.1)을 정리하면 식(2.2)와 같으며, 각 요소의 행렬로 표현하면 식(2.3)과 같다.

$$[I] = [Z_L]^{-1}([V_s] - [V_r]) \quad \dots(2.2)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & \dots & Z_{2n} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & \dots & Z_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & Z_{n3} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \left(\begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \\ \vdots \\ V_{sn} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \\ V_{r3} \\ \vdots \\ V_{rn} \end{bmatrix} \right) \quad \dots(2.3)$$

선로의 직렬임피던스 행렬은 Carson형식에 의해서 계산되며, 자기 임피던스는 식(2.4)와 같고 상호 임피던스는 식(2.5)와 같다.

1) ($i=j$) 일 경우,

$$Z_{ii} = R_i + j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{r_{ii}}{GMR_i} \right) - j2(P + jQ) \right] \quad \dots(2.4)$$

2) ($i \neq j$) 일 경우,

$$Z_{ij} = j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{r_{ij}}{r_{ij}} \right) - j2(P + jQ) \right] \quad \dots(2.5)$$

여기서,

R_i : 도체 i 의 교류저항 [Ω/m]

GMR_i : 도체 i 의 기하학적인 평균반경 [m]

r_{ij} : 도체 i 와 도체 j 사이의 거리 [m]

r_{ij} : 도체 i 와 도체 j 의 허상 사이 거리 [m]

상수 P 와 Q 는 다음과 같이 표현된다.

$$P = \frac{\pi}{8} - \frac{k \cos \theta}{3\sqrt{2}} + \frac{k^2}{16} \cos 2\theta \left(0.6728 + \ln \frac{2}{k} \right) + \frac{k^2}{16} \theta \cos 2\theta + \frac{k^3 \cos 3\theta}{45\sqrt{2}} - \frac{\pi k^4 \cos 4\theta}{1536} \quad \dots(2.6)$$

$$Q = -0.0386 + \frac{1}{2} \ln \frac{2}{k} + \frac{k \cos \theta}{3\sqrt{2}} - \frac{\pi k^2}{64} \cos \theta + \frac{k^3 \cos 3\theta}{45\sqrt{2}} - \frac{k^4 \theta \sin 4\theta}{384} - \frac{k^4 \cos 4\theta}{384} \times \left(\ln \frac{2}{k} + 1.0895 \right) \quad \dots(2.7)$$

k 와 θ 는 자기 임피던스와 상호 임피던스의 계산에 따라 값이 변화된다. 즉, $i=j$ 일 경우에는

$$k = 2.81 \times 10^{-3} r_{ii} \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad \dots(2.8)$$

$$\theta = 0 \quad \dots(2.9)$$

이며, $i \neq j$ 일 경우에는

$$k = 2.81 \times 10^{-3} r_{ij} \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad \dots(2.10)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{H_{ij}}{r_{ij}} \right) \quad \dots(2.11)$$

이 된다.
여기서,

ρ : 대지 저항률 [$\Omega \cdot m$]
 H_{ij} : 도체 i 와 j 사이의 수평거리 [m]

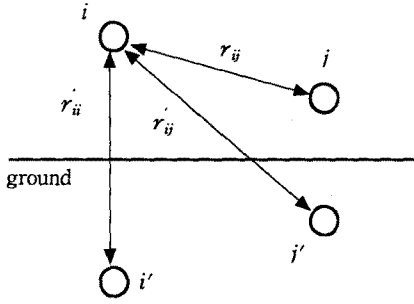


그림 2.2 도체배치 및 도체간 거리

2.1.1 선로주변의 자계 계산식

지표면에서 높이가 Y 이고 전류 I 가 흐르는 무한히 긴 하나의 도체 i 에서 거리 R 만큼 떨어진 지점 (x, y) 에서 자계 \vec{B} 의 세기는 식(2.12)와 같이 계산된다.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \cdot \frac{1}{R} \quad [T] \quad \dots(2.12)$$

여기서, $R = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2}$ 이다. 자계벡터의 방향은 \vec{R} 의 수직방향이고, \vec{B} 의 x 성분과 y 성분의 크기는 다음과 같이 계산된다.

$$B_{i,x} = \frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \cdot \frac{Y_i - y}{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} \quad \dots(2.13)$$

$$B_{i,y} = \frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \cdot \frac{X_i - x}{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} \quad \dots(2.14)$$

실제의 송전선에서는 도체의 수가 여러 개이므로 각각의 도체로부터 발생되는 자계의 x, y 성분을 분리하여 각각 합산한 후 합성치는 구하면 된다. 따라서 도체 1, 2, 3, ..., n 에 의한 자속밀도의 수평성분과 수직성분은

$$B_x = B_{1,x} + B_{2,x} + B_{3,x} + \dots + B_{n,x} \quad \dots(2.15)$$

$$B_y = B_{1,y} + B_{2,y} + B_{3,y} + \dots + B_{n,y} \quad \dots(2.16)$$

이 되며, 합성치는

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad \dots(2.17)$$

이 된다. 전류는 2π 를 주기로 반복되므로 전류의 각 위상에 대해 자계를 계산하고 그 중에서 최대치를 찾으면 된다.

2.2 해석 대상

대상 선로의 좌표는 그림(2.3)과 같으며, 선간전압은 800[kV], 도체와 가공지선은 ACSR 480mm \times 6와 AW 200mm를 적용하여 1000 [A]의 전류가 각 상에 흐르고 선로의 길이는 300[m]로 가정하였다. 해석대상은 같은 상내의 소도체 간격을 각각 30, 40, 50 [cm]일 경우, 또한 상배치를 그림(2.4)의 (b), (c)와 같이 2가지 종류로 설정하였다. 소도체 번호는 그림(2.4)(a)에 나타내었다.

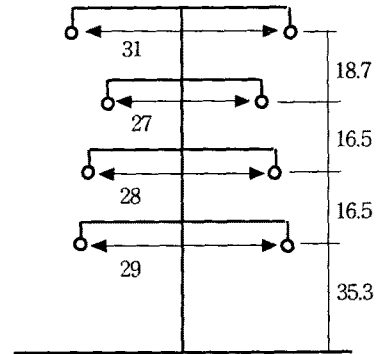
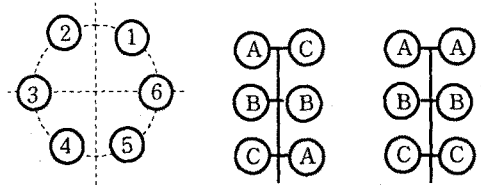


그림 2.3 해석대상 선로의 좌표(단위:m)



(a) 소도체 번호 (b) 상배치1 (c) 상배치2

그림 2.4 소도체 번호와 상배치

2.2 해석 결과

상배치1의 선로에서 소도체 간격이 40cm일 경우에 각 상과 소도체에 흐르는 전류를 계산하여 표 2.1에 나타내었다. 이 경우에 소도체간 최대 전류차는 1.3~4.4%이고, 상간에는 5.1~6.2%가 발생하였으며 중간에 위치한 B상에서 상대적으로 많은 전류가 흘렀다. 그리고, 각 소도체에 흐르는 전류가 동일한 경우와 위에서 계산된 불평형 전류인 경우에 상도체 주변의 최대 자계분포를 그림(2.5)과 그림(2.6)에, 또한 지상 1m에서 분포된 최대 자계강도를 그림(2.7)과 그림(2.8)에 나타내었다. 상도체 주변과 지상 1m에서의 자계분포를 비교하면 소도체에 동일한 전류보다 불평형 전류가 흐르는 경우에 최대 자계강도가 작았으며 분포된 형태가 상대적으로 균형을 이루었다. 이것은 자계분포가 균형을 이루도록 전류가 형성되는 것으로 분석된다. 지상에서의 자계강도도 상대적으로 작았다.

표(2.2)와 표(2.3)에는 소도체간격이 30cm와 50cm인 경우의 전류분포이다. 최대 전류차이는 소도체간격이 30cm인 경우에 소도체간에는 1.1~3.5%이고 상간에는 4.7~5.8%이며, 소도체간격이 50cm인 경우에 소도체간에는 1.5~5.3%, 상간에는 5.5~6.6%가 발생하였다. 소도체간격이 증가할수록 전류차가 큰 것으로 나타났다. 표(2.4)에는 상배치2로 선로가 구성된 경우의 전류분포이다. 회선간에는 동일한 전류가 흘렀으며 상배치1의 선로에 비해 최대 전류차가 크게 나타났다. 그리고 상간에는 17.2%의 높은 전류차이를 보였다.

표 2.1 소도체 간격이 40cm일 경우의 전류[A]

소도체 번호	상 번호 (Circuit 1)			상 번호 (Circuit 2)		
	① A상	② B상	③ C상	④ C상	⑤ B상	⑥ A상
①	163.13	172.58	167.12	163.32	171.76	163.44
②	161.91	173.2	166.04	164.27	171.06	164.76
③	163.39	172.48	162.26	167.54	171.35	163.1
④	166.19	171.61	159.75	170.06	172.84	160.23
⑤	167.37	170.97	160.83	169.15	173.59	158.89
⑥	165.8	171.22	164.43	165.67	172.8	160.44
상전류 및 최대편차	987.69	1031.74	980.37	999.93	1033.09	970.73
	$\angle -84.1$	$\angle 152.0$	$\angle 28.1$	$\angle 28.5$	$\angle 151.5$	$\angle -84.2$
	51.37			62.36		

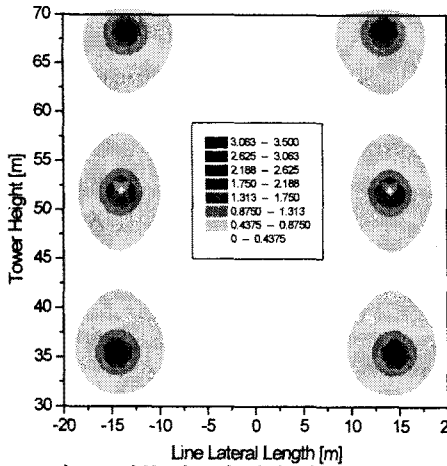


그림 2.5 평형 전류에 의한 최대 자계분포

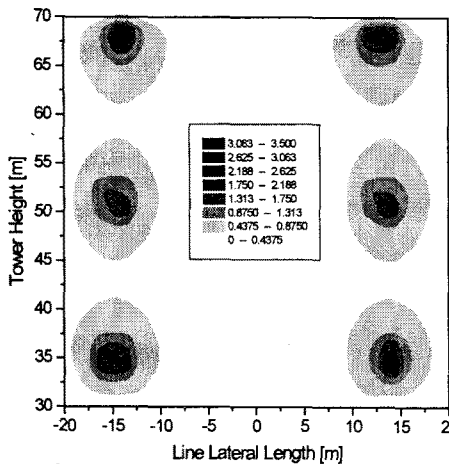


그림 2.6 불평형 전류에 의한 최대 자계분포

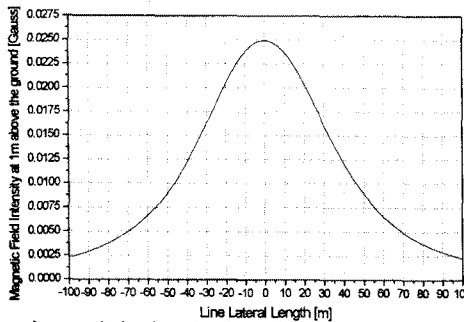


그림 2.7 평형 전류에 의한 지상 1m에서 자계강도

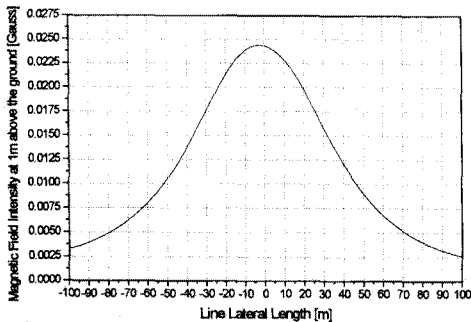


그림 2.8 불평형 전류에 의한 지상 1m에서 자계강도

표 2.2 소도체 간격이 30cm일 경우의 전류[A]

소도체 번호	상 번호 (Circuit 1)			상 번호 (Circuit 2)		
	① A상	② B상	③ C상	④ C상	⑤ B상	⑥ A상
①	163.67	172.04	166.62	164.08	171.34	163.38
②	162.69	172.54	165.76	164.83	170.77	164.44
③	163.84	171.96	162.75	167.46	171.1	163.17
④	166.03	171.17	160.72	169.47	172.3	160.91
⑤	166.99	170.67	161.58	168.74	172.89	159.83
⑥	165.78	170.96	164.47	165.98	172.26	161.04
상전류 및 최대편차	988.93 ∠-84.4	1029.14 ∠151.9	981.86 ∠28.1	1000.51 ∠28.5	1030.47 ∠151.4	972.7 ∠-84.5
	47.28			57.77		

표 2.3 소도체 간격이 50cm일 경우의 전류[A]

소도체 번호	상 번호 (Circuit 1)			상 번호 (Circuit 2)		
	① A상	② B상	③ C상	④ C상	⑤ B상	⑥ A상
①	162.66	173.09	167.67	162.63	172.16	163.57
②	161.2	173.84	166.38	163.77	171.33	165.13
③	163.01	172.96	161.84	167.65	171.57	163.08
④	166.41	172.03	158.87	170.68	173.36	159.64
⑤	167.8	171.26	160.16	169.58	174.27	158.05
⑥	165.86	171.45	164.43	165.41	173.3	159.93
상전류 및 최대편차	986.79 ∠-83.8	1034.19 ∠152.1	979.26 ∠28.0	999.61 ∠28.4	1035.56 ∠151.6	969.21 ∠-83.9
	54.93			66.35		

표 2.4 상배치 2로 구성된 선로에서 소도체 간격이 40cm일 경우의 전류[A]

소도체 번호	상 번호 (Circuit 1)			상 번호 (Circuit 2)		
	① A상	② B상	③ C상	④ C상	⑤ B상	⑥ A상
①	157.79	185.57	160.52	①과 동일	②와 동일	③과 동일
②	159.11	186.2	161.09			
③	163.14	185.19	156.53			
④	166.14	184.18	151.62			
⑤	164.87	183.47	150.97			
⑥	160.55	183.85	155.31			
상전류 및 최대편차	971.53 ∠-79.7	1107.79 ∠152.7	936.02 ∠22.5	171.77 Circuit 1과 동일		

3. 결 론

송전선로의 소도체 간격과 상배치를 다르게 구성하여 각 소도체에 흐르는 전류분포를 계산하고, 이 전류에 의해 상도체 주변에 분포되는 최대 자계와 지상 1m 높이의 최대 자계강도를 계산하여 검토하였다. 해석결과, 소도체 간격이 클수록 최대 상간 전류차가 증가했으며, 소도체간에도 전류차가 크게 나타났다. 그리고 상배치에 따라서 상당한 상간 전류차가 있었다. 이상의 결과에 따라 소도체 배치와 상배치를 적당히 구성하면 다른 장치 없이도 선로에 흐르는 전류가 균형있게 분포할 수 있음을 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] 笠原敏夫, 平井武희 2인, "大容量多道體送電線の 相配置と電流分布について", 超高壓大容量送電特集論文, Vol.21, No.3, 1971
- [2] "Transmission Line Reference Book", EPRI, 2'nd Edition, 1982
- [3] "Transmission and Distribution of Electrical Energy", Walter L. Weeks, Harper&Row Publishers, New York, 1981.
- [4] D.W.Deno, "Transmission Line Fields", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol.PAS-95, no.5, 1976