

가공송전선 유도장해 특성을 고려한 최적 상배열 연구

Study on Optimal Phase Arrangement Considering the Characteristics of Inductive Interference from Overhead Transmission Lines

강 경 두* · 김 진 규[†]
(Kyung-Doo Kang · Jin-Gyu Kim)

Abstract - The domestic overhead transmission lines use a vertical configuration and reverse phase arrangement, but when there is a limitation in steel tower height because the transmission lines pass a height limit zone or special zone, an application of triangular arrangement is necessary, and a study on the optimal phase arrangement to minimize inductive interference for this is necessary. If conductor arrangement are changed, the action of electrostatic induction and electromagnetic induction becomes different from before changes, so the changed conductor arrangement should be reviewed in terms of inductive interference. So this paper presents an optimal phase arrangement to reduce inductive interference by calculating electrostatic induction and electromagnetic induction according to conductor arrangement.

Key Words : Inductive interference, Phase arrangements, Electrostatic induction, Electromagnetic induction

1. 서 론

발전소에서 발전된 전력은 대용량 장거리 전송을 위해 높은 전압으로 승압하여 송전하는데, 최근 밀양의 송전탑 사태와 같이 사회적 갈등의 요소가 되기도 한다. 고전압, 대전류 송전선에서는 전압에 의한 정전유도와 전류에 의한 전자유도가 발생하며 이러한 유도장해를 충분히 낮추어 송전하여야 한다.

정전유도는 송전선에 접지되지 않은 물체가 놓인 경우, 도체와 반대방향의 전하가 유도되어 사람이 접촉하게 되면 사람을 통하여 대지로 방전하여 불쾌감을 유발할 수 있다. 송전선하에서 발생하는 이러한 정전유도 영향을 제한하기 위해 도체의 지상높이(지상고)는 각 전압별로 정해져 있으며, 일정 높이 이상을 유지하도록 규정하고 있다[1].

전자유도는 전력선에 흐르는 전류에 의해 발생한 자속이 가공지선과 쇠교하여 가공지선에 유도전압과 유도전류를 발생시킨다. 가공지선에 흐르는 유도전류는 패러데이 전자유도법칙에 따라 전력선 부하전류의 수 %까지 발생하여 전력손실이 되므로 이의 저감 방안에 대한 다양한 연구결과가 발표되고 있다. 가공지선으로 유도되는 전류는 가공지선 2조가 대지에 접지되어 있으므로 매 구간마다 가공지선 2조를 1개 루프로 하여 순환하면서 전력이 손실된다. 이러한 전력손실에 대한 저감 방법으로 전력선과 가공

지선 상호임피던스 감소, 가공지선 연가, 가공지선 회로의 적절한 개방(절연) 등의 연구방법이 제시되고 있다. 구체적으로 전력선과 가공지선간 상호임피던스 감소 방법은 역상배치에 따른 임피던스 감소이며, 가공지선 연가는 일정구간마다 가공지선 2조를 번갈아 꼬아 선로정수를 평형하도록 배열하는 방법이고, 가공지선 회로의 적절한 개방은 가공지선 2조 중 1조, 또는 일부구간을 애자로 절연하여 순환전류 통로가 되는 회로 고리를 끊음으로써 유도전류를 저감하는 방법이다[2-7].

이러한 유도장해를 저감하기 위하여 국내 가공송전선로는 수직배열 역상배치를 적용하고 있으나[1], 송전선로 경과지가 고도제한구역이나 특수한 지역을 경우하여 철타의 높이 제한이 있는 경우 삼각배열 적용이 필요하며 이에 대한 최적 상배열 연구가 필요하다. 도체배열이 변경되면 정전유도와 전자유도 작용이 변경전과 상이하므로 유도장해 측면에서 변경된 도체배열에 대해 검토하여야 한다. 이에 본 논문에서는 도체배열에 따른 정전유도와 전자유도를 계산하여 유도장해를 저감할 수 있는 최적 상배열을 제안한다.

2. 유도장해 개요

전기의 근원은 전하이며 전하가 만드는 전기력선이 채워진 공간을 전기장 또는 전계라고 한다. 전압이 인가된 송전선하에는 전기력선의 분포로 전기장이 형성되고 물체가 놓인 경우 그 물체는 도체의 대전된 전하에 의해 가까운 쪽에는 반대극성의 전하를, 먼 쪽에는 동일 극성의 전하를 띄게 되는데 이러한 현상을 정전유도(Electrostatic Induction)라고 한다. 한편, 상도체에 전류가 흐르면 도체와 가공지선간 상호 임피던스에 의해 가공지선

[†] Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Kyungpook National University, Korea.

E-mail: kjg@knu.ac.kr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2768-5295>

* KEPCO E&C, Korea.

Received : August 28, 2018; Accepted : December 6, 2018

에 유도전류가 흘러 전력손실이 발생한다. 이러한 현상은 도체에 흐르는 전류에 의해 발생한 자속이 인접한 가공지선과 쇄교하여 기전력을 유도하여 발생하며, 이를 전자유도(Electromagnetic Induction)라 한다[8].

2.1 정전유도

물체에 전하가 주어지면 그 주위의 공간에 전기의 장인 전계가 생기고, 전류가 흐르는 모든 물체 주위에는 자장 즉 자계가 발생한다. 송전선하에 물체가 놓였을 때 도체와 물체간의 정전적 결합으로 유도전압이 발생하므로 안전에 문제가 없도록 각 나라마다 송전선하의 지표면 전계강도를 제한하고 있다. 국내에서는 사람의 출입이 빈번한 곳에 송전선하 지표면 전계강도를 3.5 kV/m 이하로, 산악지 등 기타지역에서는 7.0 kV/m를 기준으로 지상고를 정하고 있다[1].

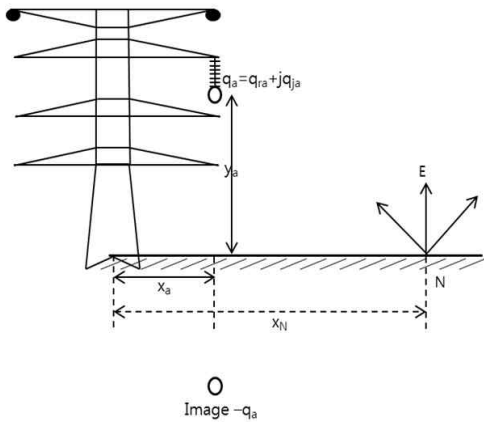


그림 1 선전하에 의한 지표면전계강도
Fig. 1 Electric field at ground caused by a line charge

그림 1의 임의의 점 N(x_N, y_N)에서 전계세기, 도체 a가 가진 전하와 지면 아래 대칭위치의 영상전하를 감안하여 다음 식과 같이 계산된다.

$$\tilde{E}_{x,a} = \frac{(q_{ra} + jq_{ia})(x_N - x_a)}{2\pi\epsilon[(x_a - x_N)^2 + (y_a - y_N)^2]} - \frac{(q_{ra} + jq_{ia})(x_N - x_a)}{2\pi\epsilon[(x_a - x_N)^2 + (y_a + y_N)^2]} \quad (1)$$

$$\tilde{E}_{y,a} = \frac{(q_{ra} + jq_{ia})(y_N - y_a)}{2\pi\epsilon[(x_a - x_N)^2 + (y_a - y_N)^2]} - \frac{(q_{ra} + jq_{ia})(y_N + y_a)}{2\pi\epsilon[(x_a - x_N)^2 + (y_a + y_N)^2]} \quad (2)$$

상기 식에서 전하량 q_a은 각 도체가 보유한 전하량과 전위간 상호 비례관계에 의해 다음 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$[Q] = [P]^{-1} [V] \quad (3)$$

여기서 [Q]는 각 도체가 보유한 전하량, [V]는 전위를 나타내며, 전위계수 행렬 [P]는 송전선로 도체 형상에 따라 정해지는 상수로서 다음 식과 같이 표현한다.

$$P_{aa} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{4y_a}{d_{eq}}\right) \quad (4)$$

$$P_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left[\frac{(x_a - x_b)^2 + (y_a + y_b)^2}{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$d_{eq} = D\sqrt{\frac{nd}{D}} \quad (6)$$

여기서 ε는 8.854 × 10⁻¹²이며, D는 번들 직경, d는 소도체 직경, n은 소도체 수, d_{eq}는 등가번들 직경, y_a, y_b는 도체 a, b의 높이, x_a, x_b는 도체 a, b의 수평 좌표를 나타낸다. N지점에서의 전계의 세기 E는 모든 도체의 기여분을 더함으로써 계산된다 [9-11].

$$\tilde{E}_x = \tilde{E}_{x,a} + \tilde{E}_{x,b} + \dots \quad (7)$$

$$\tilde{E}_y = \tilde{E}_{y,a} + \tilde{E}_{y,b} + \dots \quad (8)$$

$$E = \sqrt{\tilde{E}_x^2 + \tilde{E}_y^2} \quad (9)$$

2.2 전자유도

변압기는 1차 코일에 연결된 전원으로부터 전류가 흐르면 자속이 발생하며 철심을 따라 2차코일과 쇄교하여 유도 기전력이 발생한다. 동일한 개념으로 송전선로 상도체에 전류가 흐르면 상도체는 1차 코일, 가공지선은 2차 코일이 되어 변압기와 같은 전자유도 회로가 되어 상시에도 가공지선에 전류가 흐르게 된다 [12]. 2회선 정상운전시 가공지선으로 유도되는 전압(E_r, E_s)은 그림 2의 전력선 부하전류(I₁~I₆)와 전력선-가공지선 상호임피던스와의 곱에 의해 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다[12].

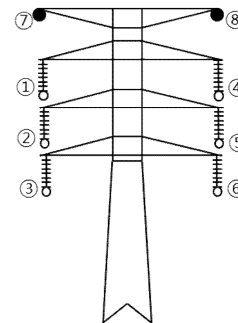


그림 2 송전선 정상운전시 전선배열
Fig. 2 Line configuration for steady state

$$E_7 = I_1 Z_{17} + I_2 Z_{27} + I_3 Z_{37} + I_4 Z_{47} + I_5 Z_{57} + I_6 Z_{67} \quad (10)$$

$$E_8 = I_1 Z_{18} + I_2 Z_{28} + I_3 Z_{38} + I_4 Z_{48} + I_5 Z_{58} + I_6 Z_{68}$$

가공지선으로 유도된 전류(I_7, I_8)는 가공지선 임피던스와의 곱에 의해 전압강하가 발생하므로 식 (10)의 유도전압은 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다[13].

$$I_7 Z_{77} + I_8 Z_{78} = I_1 Z_{17} + I_2 Z_{27} + I_3 Z_{37} + I_4 Z_{47} + I_5 Z_{57} + I_6 Z_{67} \quad (11)$$

$$I_7 Z_{87} + I_8 Z_{88} = I_1 Z_{18} + I_2 Z_{28} + I_3 Z_{38} + I_4 Z_{48} + I_5 Z_{58} + I_6 Z_{68}$$

여기서 Z_{77}, Z_{88} 는 가공지선 자기 임피던스, Z_{78} 는 가공지선 상호임피던스, $Z_{17}, Z_{27}...$ 등은 전력선-가공지선 상호임피던스를 나타낸다. 식 (11)을 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} Z_{71} & Z_{72} & Z_{73} & Z_{74} & Z_{75} & Z_{76} \\ Z_{81} & Z_{82} & Z_{83} & Z_{84} & Z_{85} & Z_{86} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{77} & Z_{78} \\ Z_{87} & Z_{88} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_7 \\ I_8 \end{pmatrix} \quad (12)$$

3. 송전선 유도장해 모델

3.1 유도장해 모델의 전선배열

가공 송전선 유도장해 모델링을 위해 345 kV 2회선 수직/삼각 전선배열을 그림 3, 4에 나타내었다. 수직배열은 국내의 2회선 송전선로에서 널리 적용되는 배열이며, 삼각배열은 고도제한으로 지지물의 높이를 제한할 필요가 있는 곳에 사용하는 배열 방식으로 바람에 의한 횡진을 고려하여 이격거리를 결정하였다[14].

정전유도에 의한 지표면전계강도 계산은 도체가 배치된 형상(그림 3, 4)에 따라 정해지는 전위계수와 전하량을 구하고 임의의 점에서 전계강도를 계산한다(식 9).

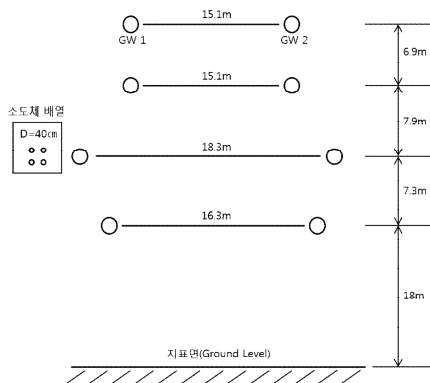


그림 3 345 kV 수직배열 모델 [15]

Fig. 3 Line configuration of 345 kV vertical model

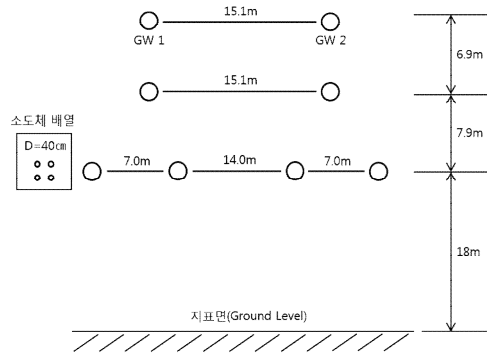


그림 4 345 kV 삼각배열 모델

Fig. 4 Line configuration of 345 kV triangular model

전자유도에 의해 가공지선에 흐르는 유도전류 계산은 각 도체에 흐르는 전류와 도체-가공지선간 자기/상호임피던스와의 곱으로 계산되므로(식 12) 각 도체별 선로정수를 구함으로써 계산이 가능하다. 도체 - 가공지선간 자기/상호임피던스는 카슨-폴라체크(Carson - Pollaczek) 식으로 계산 가능하지만, 정확한 계산을 위해 본 논문에서는 전자기과도해석프로그램(Electro Magnetic Transient Program, EMTP)을 이용하여 선로정수를 구한다. 그림 3, 4의 전선배열을 입력 데이터로 선로정수를 구하여 전자유도 계산에 활용한다.

3.2 상배열 조합

국내 송전선로의 최저 지상고 기준은 정전유도에 의한 지표면 전계강도가 3.5 kV/m 이하(산악지 7.0 kV/m)로 되도록 설계하고 있으며, 이를 위해 2회선 배치 시에는 역상배치를 기준하고 있다[1]. 일반적으로 상회전 방향은 그림 5와 같이 반시계방향으로 하고 상순은 시계방향으로 A, B, C로 정하고 있다. 역상배치는 1회선과 2회선의 상회전 순서가 반대이므로 1회선을 ABC로 기준하면 나머지 1회선은 ACB를 기준할 수 있다[16]. 모델링을 위해 조합 가능한 상배열 경우의 수는 표 1과 같다.

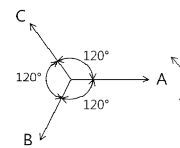


그림 5 페이서 선도

Fig. 5 Phasor diagram

표 1 검토대상 상배열 조합

Table 1 Combination of phase arrangements to be reviewed

구분	1회선	2회선(역상배치)	비고
1	ABC	ACB	Case 1
2	ABC	BAC	Case 2
3	ABC	CBA	Case 3

3.3 역행렬 계산

정전유도에 의한 전계강도는 식 (4)와 식 (5)의 전위계수 [P]와 식 (3)의 전하량 [Q]를 구하여 계산된다. 식 (3)의 전하량을 구하기 위해 전위계수 [P] 행렬의 역행렬을 계산하여야 하는데, 전위계수 [P] 행렬은 상도체 6상과 가공지선 2조를 포함한 8×8 행렬로 구성된다. 8×8 행렬의 역행렬 계산은 행렬을 분할함으로써 역행렬 계산이 가능하며, 다음과 같이 계산 가능하다.

아래 식 (13)의 n차 정방행렬 [M]의 역행렬을 구한다고 할 때, [M]의 정방행렬 요소를 식 (13)의 행렬요소 A와 D가 정방행렬이 되도록 4개의 부분행렬 A, B, C, D로 분할 할 수 있다[17].

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (13)$$

여기서 A는 p차 정방행렬, D는 q차 정방행렬, C는 q×p, B는 p×q이고, p+q = n이다. [M]의 역행렬이 아래 식 (14)로 나타내어진다고 하면,

$$M^{-1} = \begin{pmatrix} Q & R \\ S & T \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} Q &= (A - BD^{-1}C)^{-1} \\ R &= -QB D^{-1} \\ S &= -D^{-1}CQ \\ T &= D^{-1} - D^{-1}CR \end{aligned} \quad (15)$$

와 같이 나타낼 수 있어 전위계수 [P]의 역행렬을 구할 수 있다.

4. 유도장해를 고려한 최적 상배열

4.1 정전유도 계산 결과

그림 3~4 모델과 표 1의 상배열 조합을 대상으로 지표면전계강도 계산결과를 그림 6~7에 나타내었다. 그림 6, 7의 지표면전

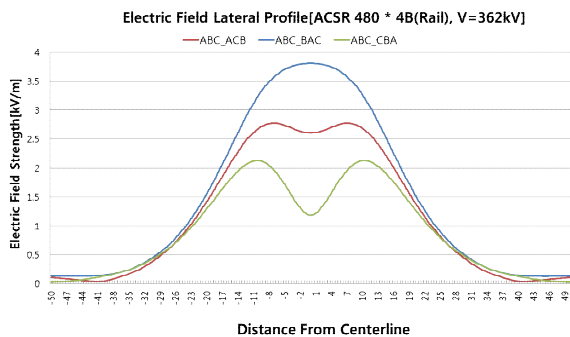


그림 6 345 kV 수직배열 지표면 전계강도
Fig. 6 Electric field profile at ground level for 345 kV vertical arrangement

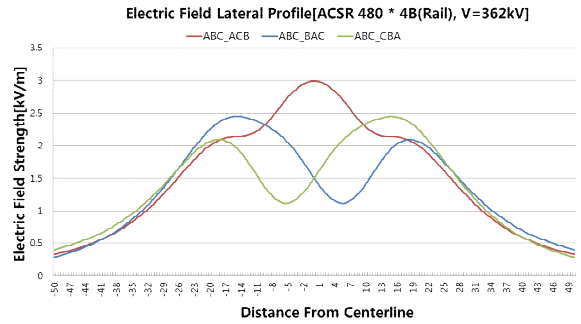


그림 7 345 kV 삼각배열 지표면 전계강도
Fig. 7 Electric field profile at ground level for 345 kV triangular arrangement

표 2 검토대상 상배열 조합(정상배치)

Table 2 Combination of normal phase arrangements to be reviewed.

구분	1회선	2회선(정상배치)	비고
1	ABC	ABC	Case 4
2	ABC	BCA	Case 5
3	ABC	CAB	Case 6

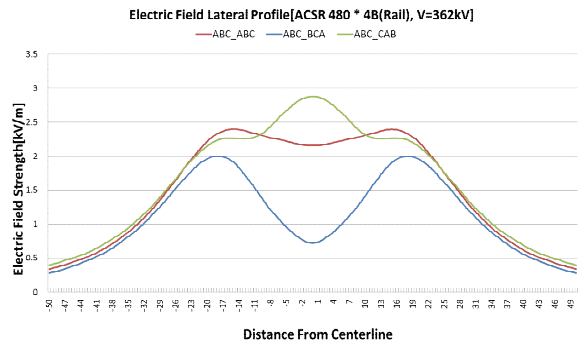


그림 8 345kV 삼각배열 지표면 전계강도(정상배치)
Fig. 8 Electric field profile for 345 kV triangular arrangement at normal phase

계강도 계산결과는 도체에서 멀어지면 전계강도가 급격히 감소하는 패턴을 보이고 있다. 그림 6의 수직배열 계산결과에서는 ABC-CBA 배열(Case 3)이 전계강도가 가장 낮아 최적배열임을 알 수 있다. 그림 7의 삼각배열 계산결과에서는 ABC-BAC, ABC-CBA 배열이 좌우 비대칭으로 계산되어 최적배열이 아님을 알 수 있다. 따라서 1회선과 2회선간 상회전 순서가 동일한 정상배치로 모델링하여 결과를 서로 비교할 필요가 있다.

삼각배열에서 정상배치시 상배열 조합은 표 2와 같고, 계산 결과는 그림 8과 같다. 그림 7과 그림 8을 비교하면, 그림 8의 ABC-BCA(Case 5) 배열이 최적배열(최대전계강도: 2.0 kV/m, 그림 8)임을 알 수 있다.

4.2 전자유도 계산 결과

가공지선 유도전류는 전력선에 흐르는 전류에 의해 그 크기가 결정되는데, 국내 345 kV 가공 송전선 ACSR 480 mm² Rail 전선의 연속허용전류 80%를 부하전류로 적용하였다. ACSR 480 mm² Rail 연속허용전류는 909 A이며 도체수 4B, 2회선을 감안하여 1,450 A를 부하전류로 적용하였다. 식 (12)에 자기/상호임피던스와 부하전류를 대입하여 가공지선 유도전류(I_7, I_8)를 계산한 결과는 표 3과 같다. 가공지선은 전력선에 의해 유도되는 전류를 충분히 통전할 수 있어야 하는데, 표 3의 모든 상배열 조합에서 가공지선 연속허용전류 범위 내에 있다.

수직배열에서는 정전유도에 의한 전계강도 계산 결과와 동일하게 ABC-CBA 배열에서 가공지선 유도전류가 가장 낮게 계산되었다. 삼각배열에서는 ABC-CAB 배열(정상배치)이 가장 낮게 계산되었다. 이상의 결과로부터 상도체에 의해 가공지선으로 유도되는 전류는 수직배열(ABC-CBA)에서 부하전류의 약 7%, 삼각배열(ABC-CAB)에서 약 4%가 발생하며, 이러한 가공지선 유도전류는 전력손실이 되므로 최대한 저감하여 송전해야 한다. 모델의 이격거리에 따라 계산결과가 달라지지만, 전체적으로 수직배열보다 삼각배열에서 가공지선 유도전류가 감소하는 것으로 나타났다.

표 3 가공지선 유도전류

Table 3 Induce current of ground wire comparing with line current

구분	1회선	2회선	345 kV			
			유도전류 (A)		백분율 ^{주2)} (%)	
			I_7	I_8	I_7	I_8
수직 배열	ABC	ACB	124.2	110.2	8.57	7.60
	ABC	BAC	108.5	121.1	7.48	8.35
	ABC	CBA	106.0	98.3	7.31	6.78
삼각 배열	ABC	ACB	99.7	94.9	6.88	6.54
	ABC	BAC	56.9	106.1	3.92	7.32
	ABC	CBA	110.4	58.2	7.61	4.01
	ABC	ABC	95.8	97.4	6.61	6.72
	ABC	BCA	96.2	109	6.63	7.52
	ABC	CAB	69.8	61.1	4.81	4.21
부하전류			1,450 A			

주 1) 345 kV 가공지선 ACSR 120 mm² 연속허용전류는 388A임.

주 2) 백분율(%) = 유도전류/부하전류

5. 결 론

본 논문에서는 가공송전선로에서 발생하는 유도장해 현상을 분석하고 유도장해 최소화가 가능한 상배열 조합을 제안하였다. 먼저 유도장해 검토를 위해 345 kV 송전선의 전선 모델과 검토 대상 상배열 조합을 선정하였다.

345 kV 2회선 송전선 수직배열에서는 ABC-CBA 조합이, 삼각배열에서는 ABC-BCA 조합이 지표면전계강도가 가장 낮게 계산되어 정전유도를 줄일 수 있는 최적 상배열로 제시되었다. 이는 민원이나 기타 건설상 이유로 지지물의 높이를 줄이기 위해 전선배열을 삼각 형태로 건설시에는 현재 수직배열에서 적용하는 역상배열이 아닌 정상배열(ABC-BCA)이 최적임을 알 수 있었다.

전자유도에 의한 가공지선 유도전류는 도체에 흐르는 전류와 전력선-가공지선 상호임피던스와 곱으로 계산된다. 345 kV 송전선의 송전용량 80%를 기준한 부하전류로 가공지선 유도전류 계산결과, 모든 상배열 조합에서 가공지선 연속 허용전류 내에 있음을 확인할 수 있었다. 345 kV 2회선 송전선 수직배열에서는 ABC-CBA 조합이, 삼각배열에서는 ABC-CAB 조합이 가공지선 유도전류를 가장 감소시킬 수 있는 조합으로 제시되었다.

삼각배열 유도장해 계산결과, 정전유도 측면에서의 최적배열과 전자유도 측면에서의 최적배열이 다르게 제시되었다. 식 (11)에 의해 가공지선 유도전류 감소를 위해서는 전력선-가공지선 상호임피던스를 줄여야 하는데, 예를 들어 그림 4 전력선-가공지선간 이격거리를 6.9 m에서 7.9 m로 1 m 증가하여 계산하면, ABC-BCA 조합에서 $I_7 = 85.5$ A, $I_8 = 96.9$ A로 이격거리 증가 전에 비해 감소하지만, 동시에 ABC-CAB 조합에서 $I_7 = 58.7$ A, $I_8 = 50.7$ A로 감소하는 결과를 나타낸다. 따라서 삼각배열에서 최적 상배열을 결정하는데 정전유도와 전자유도를 동시에 만족하는 상배열 선정은 어려우며, 지표면에서 전계강도 감소가 가능하여 전선의 지상고를 줄여 경제적인 송전선 건설이 가능한 ABC-BCA 조합으로 선정하는 것이 타당하다.

본 논문의 결과로부터 송전선에서 발생하는 유도장해는 2회선 6상의 배치형태에 따라 달라지는데 결국 6상의 벡터 합을 줄일 수 있는, 즉 동일한 상이 인접하지 않고 가능한 멀리 배치할수록 유도장해 크기가 적어짐을 알 수 있다.

본 논문을 통하여 유도장해 저감이 가능한 상배열 조합과 설계기법을 제시함으로써 송전선 설계·시공에 활용되기를 기대한다.

References

- [1] KEPCO(2013), "Design Standard for Transmission Line Ground Clearance", *DS-1020, KEPCO*.
- [2] A. Ametani, D. Van Dommelen, I. Utsum, "Study of super-bundle and low reactance phasings on untransposed twin-circuit lines", *IEEE Proceedings*, Vol. 137, Pt.C, No. 4, JULY 1990.
- [3] A. Nourai, A.J.F. KERI, C.H. Shih, "Shield Wire Loss Reduction for Double Circuit Transmission lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No. 4 October 1988.
- [4] Hui Wang, Luyang Wang, Yufei Wang, Hua Xue, Changhui Yang, and Tianyou Yan, "The Electric Energy Loss in Overhead Ground Wires of 110kV six-circuit Transmission Line on the Same Tower", *IEEE PES ISGT ASIA 2012*.
- [5] Dale E. Hedman and Henry C. Samplers, "345 kV Line

- 60Hz Ground Wire Losses”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. Pas-87, No. 2, February 1968.
- [6] Jianguo Wang, Yu. Wang, Xiangyang Peng, Xianqiang Li, Xiaogang Xu, Xianyin Mao, “Induced Voltage of Overhead Ground Wires in 500kV Single-Circuit Transmission Lines”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 29, No. 3, June 2014.
- [7] A. J. F. Keri, A. Nourai, J. M. Schneider, “The Open Loop Scheme: An Effective Method of Ground Wire Loss Reduction”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. Pas-103, No. 12, December 1984.
- [8] K.Y. Song, “Transmission and Distribution Engineering”, Dongilbook Co., 1992.
- [9] “Transmission line Reference Book-345 kV and above/ Second Edition”, Electric Power Research Institute, 1982.
- [10] Rakosh Das Begamudre, “Extra High Voltage AC Transmission Engineering(Third Edition)”, New Age International Publishers, 2006.
- [11] R. M Radwan, A. M. Mahdy, M. Abdel-Salam and M. M. Samy, “Electric Field Mitigation under Extra High Voltage Power Lines”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 20, No.1, February 2013.
- [12] Transmission Line Construction Study, “Construction Guide Book for Stringing Overhead Conductor”, *Trans. KEPCO E&C*, Electricalbook Co., 1998.
- [13] Dale E. Hedman and Henry C. Samplers, “345kV Line 60Hz Ground Wire Losses”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. Pas-87, No. 2, February 1968.
- [14] KEPCO(2013), “Design Standard for Overhead Transmission Line Sag Design”, DS-1211, KEPCO
- [15] “345kV Boryung-Chungyang T/L Tower Specification”, KOMIPO, 2006.
- [16] K.N Koda, “Handbook of Power System Engineering Calculation”, Trans. J.C. Kim, Uijaebooks Co., 1998.
- [17] James M. Gere, William Weaver, Jr. “Matrix Algebra for Engineer”, *PWS Engineering*, 1983.

저 자 소 개



강 경 두 (Kyung-Doo Kang)

1971년 8월 20일생, 1995년 부경대학교 전기공학과 졸업(학사), 2018년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1995~현재 한국전력기술 근무.

E-mail: kang1@kepc0-enc.com



김 진 규 (Jin-Gyu Kim)

1967년 2월 24일생, 1998년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 경북대학교 IT대학 전기공학과 교수.

E-mail: kjpg@knu.ac.kr