

# ±500kV HVDC 2회선 송전선로의 전기환경특성 예측 및 평가

## Prediction and Analysis of Electrical Environmental Characteristics under ±500kV HVDC Double Bipole Transmission Line

우정민\* · 주문노\* · 신구용\*\* · 권구민\*\* · 최우정\*\*\* · 이재현\*\*\*

(Jeong Min Woo · Mun-No Ju · Koo Yong Shin · Gu Min Kwon · Woo Jung Choi · Jae Hyun Lee)

**Abstract** - Since Korea has a small land area, it is expected to construct the conductor return type with neutral wire in the case of ± 500kV HVDC double bipole transmission line. Therefore, in order to apply ± 500kV HVDC double bipole transmission line with neutral wire in Korea, it is necessary to develop technology for insulation and environmental designs. In this study, radio interference, audible noise, electric field and ion current density according to the polarity arrangement were compared and assessed in the ± 500kV HVDC double bipole transmission line with the conductor return method. And the optimum configuration of HVDC double bipole transmission line was determined from the viewpoint of electrical environment.

**Key Words** : HVDC Double bipole line, Radio interference, Corona noise, Electric field, Ion current density

### 1. 서론

±500kV HVDC Single Bipole 송전선로는 1980년대 이후 북미, 중국, 인도 등에서 이미 상용화되어 활발히 적용되고 있다. Double Bipole 방식은 2000년대 후반 이후 중국에서 개발하여 세계 최초로 적용되고 있는 방식이다.[1] ±500kV Bipole 방식을 적용하고 있는 중국은 중성선이 없는 도체귀로 방식으로서 이는 우리나라와 같이 국토 면적이 좁은 경우에는 전식과 부식 등의 문제를 유발할 수 있다. 따라서 국내에서는 ±500kV 2회선 송전선로의 경우 중성선을 가진 도체귀로 방식을 적용할 예정이다.

도체귀로(중성선) 방식의 적용으로 인해 철탑설계를 비롯한 절연설계와 환경설계 및 금구류 개발 등 HVDC 가공선로의 건설에 있어서 모든 부분이 변경되어야 하며 전 세계적으로 이에 대한 상용화 사례는 전무하다. 따라서 국내에서 도체귀로 방식의 ±500kV HVDC 가공선로를 적용하기 위해서는 절연설계, 환경설계 및 금구류설계에 대한 국내 기술자립화가 필요한 실정이다. 특히 전기환경분야는 송전선로 건설 후 운영시 선로 경과지 주변에서 발생할 수 있는 모든 환경장해문제를 최소화하기 위해 국내 환경실정에 맞는 송전선로 설계안을 정립해야한다. HVDC 가공송전선로에서 발생할 수 있는 전기환경장해는 그림 1과 같이 선로

의 코로나 방전에 의한 코로나 소음, 라디오 수신장해, 대전전압, 지표면 전계 등이 있다. 직류 송전선로의 전기환경장해량은 극간격, 지상고와 소도체 형상 등에 따라 변화할 수 있기 때문에 각각의 선로형상에서 전기환경장해 관점으로 가장 유리한 선로형상을 평가하여 송전선로 설계시 고려해야 한다.[2-5] 본 연구에서는 2회선 가공송전선로 경과지 주변에서 발생할 수 있는 전기환경장해가 인체 및 전기설비에 영향을 최소화 되도록 각각의 장해량을 예측 및 평가하여 전기환경관점에서 도체귀로형 HVDC ±500kV 2회선 가공송전선로의 최적선로 형상을 제시하였다.

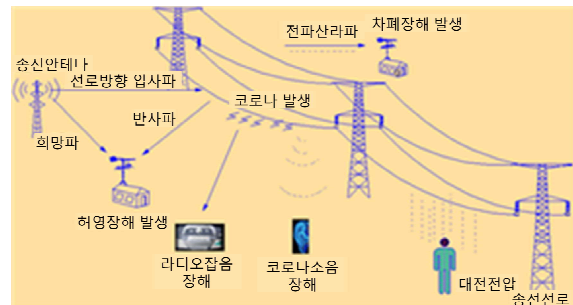


그림 1 HVDC 가공송전선로 전기환경장해 개략도

Fig. 1 Electrical environmental interference scheme of HVDC transmission line

### 2. 전기환경장해 평가

#### 2.1 전기환경장해 평가 계산조건

HVDC ±500kV Double Bipole의 전기환경장해를 평가하기 위

† Corresponding Author : Electrical Environment Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute, Korea.  
E-mail: woojm@keri.re.kr

\* Electrical Environment Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute, Korea.

\*\* Korea Electric Power Research Institute (KEPRI), Korea Electric Power Corporation (KEPCO), Korea.

\*\*\*New Transmission Division, Korea Electric Power Corporation (KEPCO), Korea

Received : December 5, 2017; Accepted : March 9, 2018

해 그림 2와 같이 4가지 형태의 극배치 방안을 고려하였다. 또한 소도체 방식, 직경 등과 같은 도체사양 및 전기환경장해 평가조건을 표 1에 나타냈으며, 애자 종류에 따른 선로형상 조건은 표 2에 나타낸 것처럼 지상고는 거의 유사하고 극간격이 약 15m에서 25m로 변화된다. 전기환경장해 평가를 위한 계산은 Matlab 7.0을 기준으로 이루어졌다. 이온을 고려하지 않는 Deutsch's assumption이 아닌 Ion-coupling을 고려한 직류전계와 이온밀도 등을 계산하였고, 지배방정식은 아래와 같다.

$$\nabla \cdot E = -\frac{(\rho^+ - \rho^-)}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$J^\pm = \rho^\pm k^\pm E \quad (2)$$

$$\nabla \cdot J^\pm = -\frac{R\rho^\pm}{e} \quad (3)$$

단,  $E$  : 직류전계  $\rho^\pm$  : 양/음 전하 밀도  
 $\epsilon_0$  : 유전상수  $J^\pm$  : 양/음 이온전류밀도  
 $k^\pm$  : 양/음 이온 이동도  $R$  : 결합 상수  
 $e$  : 전자 전하  $e = 1.602 \times 10^{-19} C$

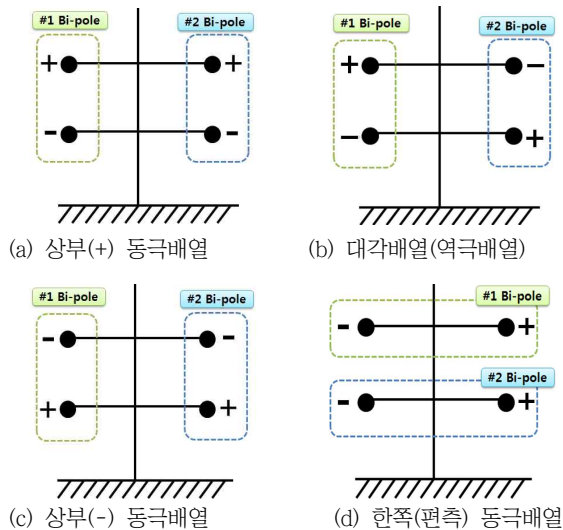


그림 2 Double bipole의 극배치  
 Fig. 2 Pole configuration of double bipole

2.2 전기환경장해 평가 계산결과

(+)극성에서 발생하는 코로나 방전펄스는 (-)극성에 비해 펄스 크기가 크며 지속시간이 길기 때문에 EMI (Electromagnetic Interference)의 주요 발생원은 (+)극성에서의 코로나 방전이다. [6] 직류가공송전선로의 (+)극성 측에서 발생하는 코로나 소음 및 라디오 잡음은 (-)극성측 보다 크게 나타나기 때문에 (+)극성측 직하 부근에서 코로나 소음 및 라디오 잡음량을 측정 및 평가하는 것이 일반적이다. 따라서 HVDC 2회선의 송전선로의 극배

치를 고려할 때 (+)극성을 (-)극성보다 지면에서 멀리 배치하는 것이 코로나 소음 및 라디오 장해 대책 관점에서 유리하다. 또한 가공송전선로에서 전기환경장해에 영향을 미치는 가장 주요한 요소는 도체표면전계이기 때문에 각 극의 도체표면전계가 낮아질 수 있는 형상으로 설계하는 것이 중요하다.

표 1 500 kV 송전선로 도체사양 및 평가조건

Table 1 500 kV Transmission line conductor specification and assessment condition

Conductor specification	Value
Pole/Neutral conductor diameter, [mm]	30.40
Pole/Neutral subconductor spacing, [cm]	40
Pole number of subconductor	6 B
Neutral number of subconductor	4 B
Vertical height of microphone, [m]	1.5
Vertical height of RI antenna, [m]	2
Frequency at which radio interference are to be calculated, [MHz]	0.5

표 2 500 kV 2회선 송전선로 철탑사양

Table 2 500 kV double bipole tower configuration

		#1 Bipole, [m]			#2 Bipole, [m]		
		상부	하부	중성선	상부	하부	중성선
자기 애자 I련	수평 좌표	-12.3	-12.8	-13.3	12.3	12.8	13.3
	수직 좌표	36.5	21	48.38	36.5	21	48.38
자기 애자 V련	수평 좌표	-8.38	-8.88	-9.38	8.38	8.88	9.38
	수직 좌표	35.5	21	47.06	35.5	21	47.06
자기 애자 내장	수평 좌표	-8.97	-9.46	-11.1	8.97	9.46	11.1
	수직 좌표	35	21	45	35	21	45
폴리머 애자 I련	수평 좌표	-11.3	-11.8	-12.3	11.3	11.8	12.3
	수직 좌표	35	21	45.25	35	21	45.25
폴리머 애자 V련	수평 좌표	-7.48	-7.98	-4.24	7.48	7.98	4.24
	수직 좌표	34.6	21	45.42	34.6	21	45.42

\* 수직좌표 기준점: 지표면, 수평좌표 기준점: 철탑중앙

2.2.1 상부(+) 동극배열

(+)극을 상부로 모두 배치한 경우 동일한 극성이 수평배열되기 때문에 표 3과 같이 극간격 변화에 따른 도체표면전계는 크게 차이가 나지 않아 모든 철탑형상에서 유사하게 나타난다. 따라서 선로형상 중 극간격이 15m로 가장 작은 폴리머 애자 V련과 25m로 가장 큰 자기애자 I련의 도체표면전계는 거의 동일하

게 나타났다. 이와 같이 동일한 극성을 수평으로 배치하는 경우는 극간격보다는 지상고와 상·하부간 거리가 도체표면전계에 영향을 더 주기 때문에 상부 (+) 동극배열은 상·하부간 거리가 작은 선로형상 중 극간거리가 가장 큰 폴리머 애자 I련의 도체표면전계가 가장 크게 나타났다. 이러한 이유로 상부(+) 동극배열의 코로나 소음 및 라디오 잡음은 그림 3과 그림 4와 같이 폴리머

표 3 상부(+) 동극배열의 철탑사양별 도체표면전계

Table 3 Maximum surface voltage gradients according to tower configuration of same positive polarity in upper

	#1 Bipole [kV/cm]		#2 Bipole [kV/cm]	
	상부	하부	하부	상부
자기 애자 I련	16.78	-17.04	-17.04	16.78
자기 애자 V련	16.77	-16.81	-16.81	16.77
자기 애자 내장	17.17	-17.04	-17.04	17.17
폴리머 애자 I련	17.38	-17.33	-17.33	17.38
폴리머 애자 V련	17.07	-16.91	-16.91	17.07

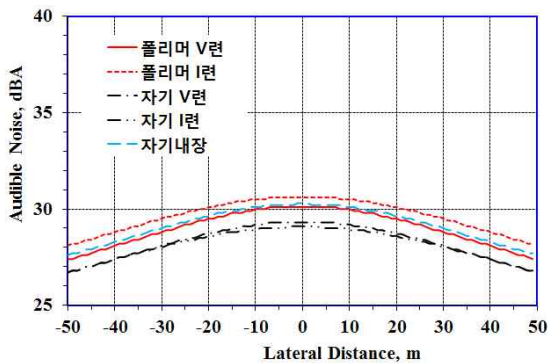


그림 3 상부(+) 동극배열의 선로형상별 코로나소음  
Fig. 3 Audible noise according to tower configuration of same positive polarity in upper part

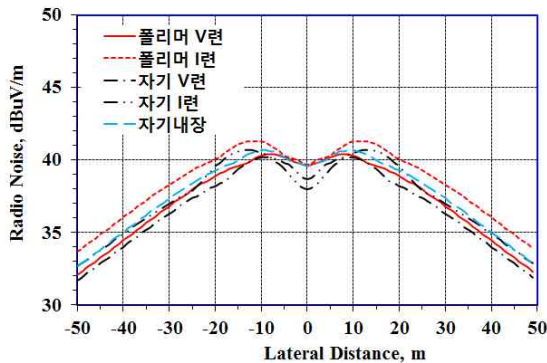


그림 4 상부(+) 동극배열의 선로형상별 라디오잡음  
Fig. 4 Radio interference according to tower configuration of same positive polarity in upper part

애자 I련이 가장 크게 발생된다.

지표면 전계와 이온전류밀도는 (-)극성이 선로 하부에 모두 배치되었기 때문에 하부에 위치한 (-)극성의 전계방향이 동일하여 서로 다른 극성을 하부에 배치하는 배열보다 크게 나타난다.

그림 5와 그림 6에는 선로형상별 지표면 전계와 이온전류밀도의 예측값을 나타냈다.

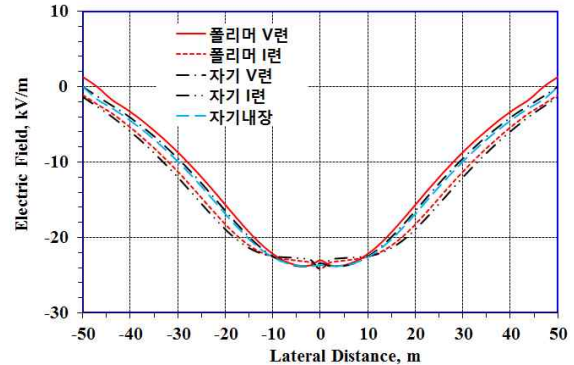


그림 5 상부(+) 동극배열의 선로형상별 지표면전계  
Fig. 5 Electric field according to tower configuration of same positive polarity in upper part

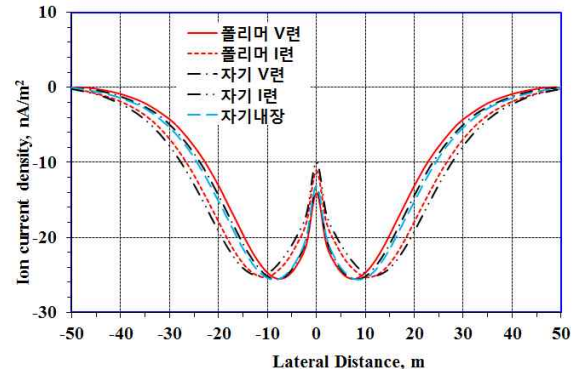


그림 6 상부(+) 동극배열의 선로형상별 이온전류밀도  
Fig. 6 Ion current density according to tower configuration of same positive polarity in upper part

### 2.2.2 대각배열

동일한 극성을 대각으로 배치하는 경우 극간격과 상부암과 하부암 거리가 가장 작은 폴리머 애자 V련이 서로 다른 극성의 영향을 크게 받아 표 4와 같이 도체표면전계가 가장 크게 나타난다. 이러한 이유로 코로나 소음 및 라디오 잡음의 경우는 그림 7과 그림 8과 같이 폴리머 애자 V련이 가장 크게 발생된다.

대각배열인 경우 지표면 전계와 이온전류밀도는 하부에 위치한 도체가 서로 다른 극성을 가지기 때문에 지표면에서의 전계가 다른 극성에 의해 상쇄되는 효과를 나타내 그림 9와 그림 10에

나타낸 바와 같이 동일한 극성을 하부에 배열하는 방식보다 작게 나타났다.

표 4 대각배열의 철탑사양별 도체표면전계

Table 4 Maximum surface voltage gradients according to tower configuration of same polarity in diagonal-position

	#1 Bipole [kV/cm]		#2 Bipole [kV/cm]	
	상부	하부	하부	상부
자기 애자 I련	17.79	-17.56	17.56	-17.79
자기 애자 V련	18.58	-18.27	18.27	-18.58
자기 애자 내장	18.68	-18.25	18.25	-18.68
폴리머 애자 I련	18.35	-17.96	17.96	-18.35
폴리머 애자 V련	18.91	-18.69	18.69	-18.91

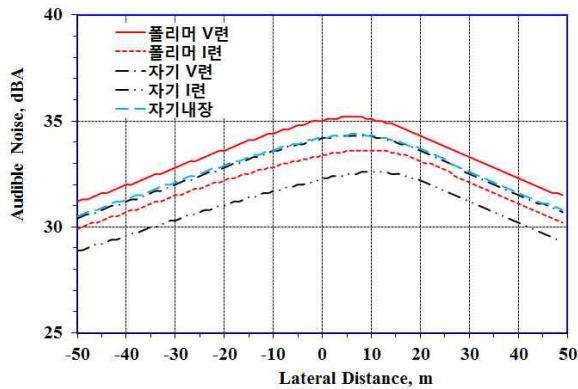


그림 7 대각배열의 선로형상별 코로나소음  
Fig. 7 Audible noise according to tower configuration of same polarity in diagonal-position

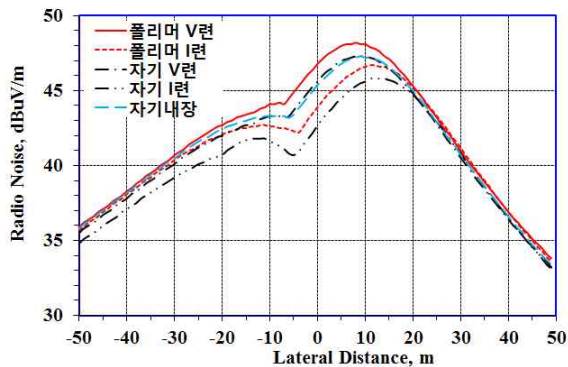


그림 8 대각배열의 선로형상별 라디오잡음  
Fig. 8 Radio interference according to tower configuration of same polarity in diagonal-position

### 2.2.3 상부(-) 동극배열

표 5와 같이 (-)극을 상부로 모두 배치하는 경우 상부 (+) 동극배열과 극성만 다를 뿐 동일한 도체표면전계 크기를 나타낸다.

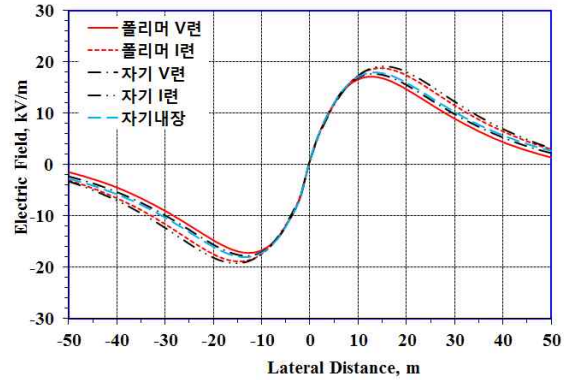


그림 9 대각배열의 선로형상별 지표면전계  
Fig. 9 Electric field according to tower configuration of same polarity in diagonal-position

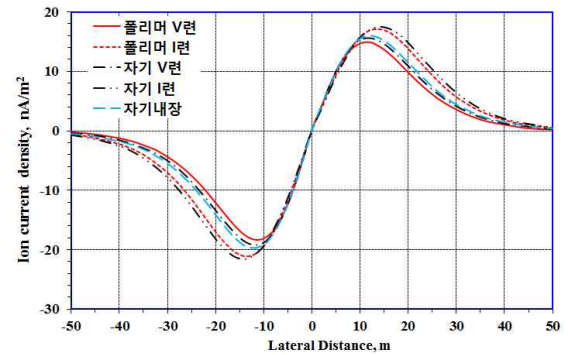


그림 10 대각배열의 선로형상별 이온전류밀도  
Fig. 10 Ion current density according to tower configuration of same polarity in diagonal-position

표 5 상부(-) 동극배열의 철탑사양별 도체표면전계

Table 5 Maximum surface voltage gradients according to tower configuration of same negative polarity in upper part

	#1 Bipole [kV/cm]		#2 Bipole [kV/cm]	
	상부	하부	하부	상부
자기 애자 I련	-16.78	17.04	17.04	-16.78
자기 애자 V련	-16.77	16.81	16.81	-16.77
자기 애자 내장	-17.17	17.04	17.04	-17.17
폴리머 애자 I련	-17.38	17.33	17.33	-17.38
폴리머 애자 V련	-17.07	16.91	16.91	-17.07

따라서 상부(-) 동극배열도 폴리머 애자 I련의 도체표면전계가 가장 크게 나타났다. 또한 직류송전선로의 (+)극성에서 코로나 방전 발생시 펄스의 크기 및 지속시간이 (-)극성보다 크게 발생하

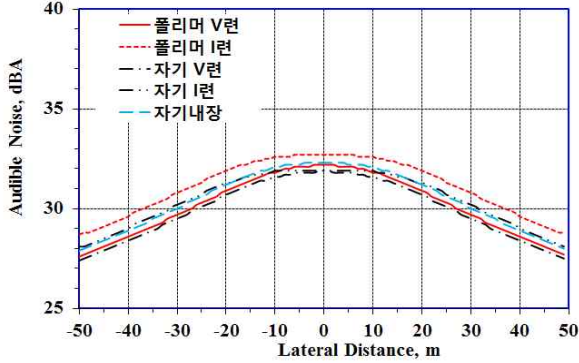


그림 11 상부(-) 동극배열의 선로형상별 코로나소음  
 Fig. 11 Audible noise according to tower configuration of same negative polarity in upper part

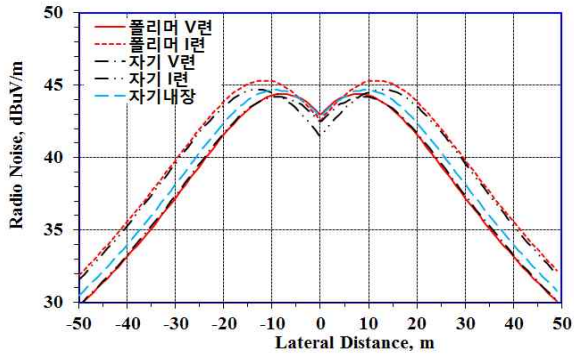


그림 12 상부(-) 동극배열의 선로형상별 라디오잡음  
 Fig. 12 Radio interference according to tower configuration of same negative polarity in upper part

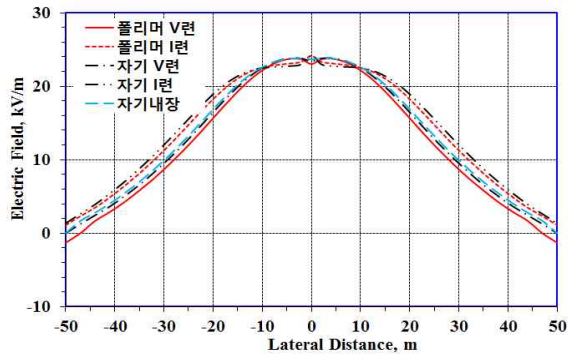


그림 13 상부(-) 동극배열의 선로형상별 지표면전계  
 Fig. 13 Electric field according to tower configuration of same negative polarity in upper part

는 특성을 나타내기 때문에 (+)극성의 코로나 방전에 의한 코로나 소음 및 라디오 잡음은 (-)극성보다 크다.

그림 11과 그림 12와 같이 (+)극성을 하부 쪽에 위치한 상부(-) 동극배열의 코로나 소음 및 라디오 잡음은 상부(+) 동극배열보다 크게 발생된다. 그림 13과 그림 14에서는 상부(-) 동극배열의 2회선 선로 경우의 철탑형상별 지표면 이온전류밀도, 이온전류밀도의 예측값을 나타냈다.

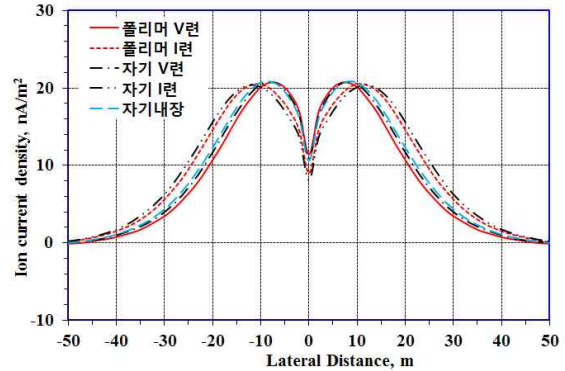


그림 14 상부(-) 동극배열의 선로형상별 이온전류밀도  
 Fig. 14 Ion current density according to tower configuration of same negative polarity in upper part

### 2.2.4 한쪽(편측) 동극배열

동일한 극성을 한쪽으로 모두 배치한 경우 동일한 극성이 수직으로 배열되기 때문에 도체표면전계에 영향을 주로 미치는 요소는 극간격이 된다. 따라서 표 6과 같이 극간격이 가장 작은 폴리머 애자 V련의 도체표면전계가 가장 크게 나타났다. 그러나 동일한 극성을 한쪽으로 배치하면 상부암과 하부암에 설치된 선로의 극성영향이 다른 극성배열보다 적어 도체표면전계 크기가 상대적으로 가장 낮게 된다. 따라서 도체에서 다른 극성배열방식보다 코로나 방전이 발생할 가능성이 가장 작아 그림 15와 그림 16와 같이 라디오 장애, 코로나 소음이 가장 작게 발생된다. 그림 17과 그림 18에서는 한쪽 동극배열의 선로형상별 지표면 전계와 이온전류밀도의 예측값을 나타냈다.

표 6 한쪽(편측) 동극배열의 철탑사양별 도체표면전계  
 Table 6 Maximum surface voltage gradients according to tower configuration of the same polarity in one-side

	#1 Bipole [kV/cm]		#2 Bipole [kV/cm]	
	상부	하부	하부	상부
자기 애자 I련	-13.94	-13.72	13.72	13.94
자기 애자 V련	-15.36	-15.05	15.05	15.36
자기 애자 내장	-15.17	-14.74	14.74	15.17
폴리머 애자 I련	-14.23	-13.85	13.85	14.23
폴리머 애자 V련	-15.61	-15.39	15.39	15.61

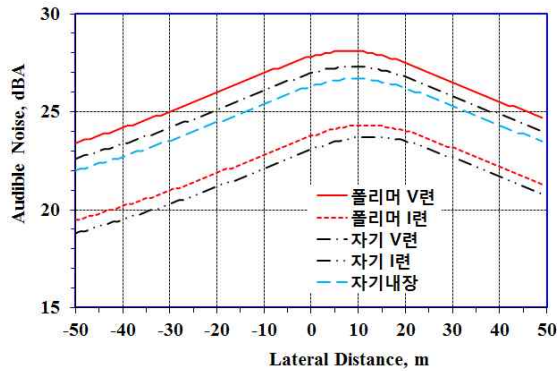


그림 15 한쪽 동극배열의 선로형상별 코로나소음  
 Fig. 15 Audible noise according to tower configuration of the same polarity in one-side

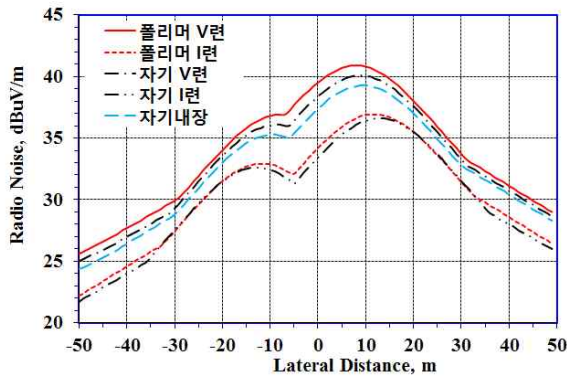


그림 16 한쪽 동극배열의 선로형상별 라디오잡음  
 Fig. 16 Radio interference according to tower configuration of the same polarity in one-side

### 2.3 종합 평가

전기환경장해관점에서 도체귀로방식의 ±500kV HVDC 2회선 송전선로의 극성배치를 선정하기 위해 극성배치에 따른 전기환경장해량을 표 7에 나타내었다. 지표면 전계는 하부에 서로 다른 극성을 가지는 대각배열인 경우 가장 낮은 크기를 나타내었으며, 이온전류 밀도는 상부(-) 동극배열에서 가장 낮은 값을 보였다. 직류송전선로에서 라디오잡음, 코로나소음은 주로 (+)극성에서 크게 발생되기 때문에 (+)극성이 상부선로에 위치하는 경우가 전기환경관점에서 유리하다. 또한 도체표면전계강도가 낮은 방식이 코로나방전을 발생시킬 확률이 낮기 때문에 도체표면전계강도가 낮은 선로형상이 전기환경 관점에서 유리하다. 따라서 한쪽으로 동일한 극성을 배치하는 한쪽 동극배열이 전기환경관점에서 가장 유리하다. 그러나 선로를 운영하는 관점에서 한쪽 동극배열은 상부 1회선 보수작업시 안전상 하부회선도 정지할 필요가 있기 선로보수관점에서 불가능할 수도 있다. 또한 상부(+) 동극배열 및 상부(-) 동극배열은 대각배열 보다 낙뢰사고율이 높다는 연구결

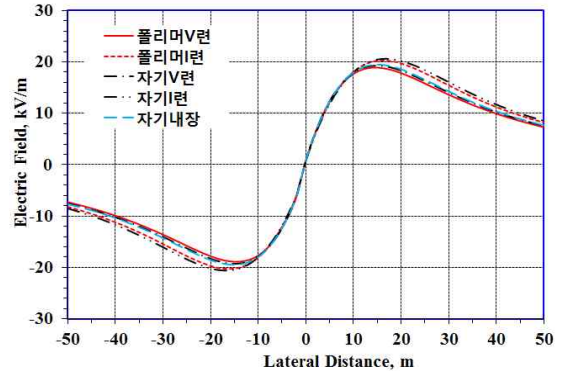


그림 17 한쪽 동극배열의 선로형상별 지표면전계  
 Fig. 17 Electric field according to tower configuration of the same polarity in one-side

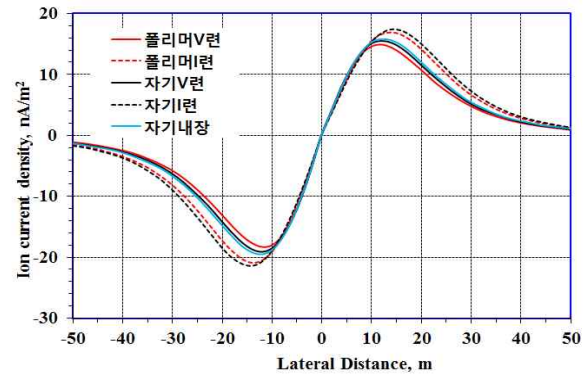


그림 18 한쪽 동극배열의 선로형상별 이온전류밀도  
 Fig. 18 Ion current density according to tower configuration of the same polarity in one-side

표 7 ±500kV HVDC 2회선 T/L 극성배치별 전기환경장해  
 Table 7 Electrical environmental interferences according to the polarity arrangement under ±500 kV HVDC Double Bipole Transmission Line

선로형상 항목	상부(+) 동극배열	대각 배열	상부(-) 동극배열	한쪽 동극배열
지표면 전계 [kV/m]	24.19	<b>19.16</b>	24.19	20.59
이온전류밀도 [nA/m <sup>2</sup> ]	25.10	21.60	<b>20.40</b>	21.40
도체표면전계 [kV/cm]	-17.04	-17.79	17.04	<b>13.94</b>
코로나 소음 [dBA]	28.6	32.5	31.8	<b>23.8</b>
라디오 장애 [dB, uV/m]	41	46	44.5	<b>36.8</b>
운영 및 보수	Bi-pole당 휴전작업 가능			상부 휴전시 2Bi-pole 정지 필요

\*중성선 상부배치, 본선 6도체 및 자기리전 기준

과가 있다.[7] 따라서 한쪽 동극배열이 전기환경관점에서 가장 유리하지만, 4가지 형태의 극배치 모두 가공송전선로 설계 기준치를 만족시키므로 현장적용시 보수 및 뇌사고율을 종합적으로 검토하면 대각배열을 차선책으로 고려할 수 있다.

### 3. 결 론

도체귀로형 HVDC ±500kV 2회선 가공송전선로의 최적선로 형상을 선정하기 위하여 4가지 형태의 극배치 방안을 전기환경관점에서 검토하였다.

1. 극배치 및 애자형태를 변화한 2회선 선로형상 중에서 대각배열이 코로나 소음과 라디오 잡음이 가장 크게 발생하였으나, 4 가지 형태의 2회선 선로형상들도 가공송전선로 설계 기준값을 만족하였다.
2. 극배치 및 애자형태를 변화한 모든 2회선 선로형상에서 지표면 전계강도의 L5(95% 발생확률값)은 약 25kV/m 이하로 발생되어 HVDC 가공송전선로 설계 기준치를 만족하였다.
3. 전기환경관점에서 한쪽으로 동일한 극성을 배치하는 배열이 전기환경관점에서 가장 유리하지만 현장적용시 보수 및 뇌사고율을 종합적으로 검토하면 대각배열을 차선책으로 고려할 수 있다.

### References

[1] IEC/TR 62681, Electromagnetic performance of high voltage direct current (HVDC) overhead transmission lines

[2] P. S. Maruvada, Corona in Transmission Systems: Theory, Design and Performance. Johannesburg, South Africa: Eskom Holdings, 2011.

[3] DL/T 436-2005, Technical Guide for HVDC Overhead Transmission Lines.

[4] P.S. Maruvada, "800 kV HVDC transmission systems," IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008.

[5] Yukio Nakano, Member Mitsuo Fukushima, "Statistical Audible Noise Performance of Shiobara HVDC Test Line", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, January 1990.

[6] P. S. Maruvada, Corona Performance of High Voltage Transmission Lines, Baldock, Hertfordshire, England: Research Studies Press Ltd., 113-118, 2000.

[7] V. Jimenez, J. Montaña, J. Candelo, and C. Quintero "Estimation of the shielding performance of transmission lines considering effects of landform, lightning polarity and stroke angle" Electr Eng, 1-11, 2017.

## 저 자 소 개



### 우 정 민 (Jeong Min Woo)

2016년 광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부 졸업(박사). 2016년~현재 한국전기연구원 차세대전력망연구본부 전기환경연구센터 선임연구원.

E-mail : woojm@keri.re.kr



### 주 문 노 (Mun-no Ju)

1968년 7월 7일생. 1996년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 한국해양대 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 한국전기연구원 차세대전력망연구본부 전기환경연구센터 책임연구원.

E-mail : mnju@keri.re.kr



### 신 구 용 (Koo Yong Shin)

1967년 7월 8일생. 1993년 9월 경남대 전기공학과 졸업(석사). 1988년 한국전력공사 입사. 현재 한전 전력연구원 차세대송변전연구소 송변전그룹 책임연구원.

E-mail : kyshin@kepco.co.kr



### 권 구 민 (Gu Min Kwon)

2013년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 졸업(석사). 2016년~현재 한전 전력연구원 차세대송변전연구소 일반연구원.

E-mail : gmkwon@kepco.co.kr



### 최 우 정 (Woo Jung Choi)

2004년 서울시립대학교 전자전기공학부 졸업(학사). 2004년 한국전력공사 입사, 현재 한전 신송전사업처 신송전건설실(HVDC) 근무.

E-mail : wjchoi@kepco.co.kr



### 이 재 현 (Jae Hyun Lee)

2007년 중앙대학교 전기전자공학부 졸업(학사). 2007년 한국전력공사 입사, 현재 한전 신송전사업처 신송전건설실(HVDC) 근무.

E-mail : dshlee0000@kepco.co.kr