

축소모델을 이용한 Hybrid 송전선로의 도체구성별 지표면 전계강도 특성 연구

임재섭\*, 신구용\*, 김영홍\*, 최인혁\*, 이동일\*  
한전 전력연구원\*

A Study for Electric Field Intensity of AC/DC Hybrid Transmission Line using Reduced Scale Model

Jae-Seop Lim\*, Koo-Yong Shin\*, Young-Hong Kim\*, In-Hyuk Choi\*, Dong-Il Lee\*  
Korea Electric Power Research Institute\*

**Abstract** - 주파수가 다른 계통을 연계하거나, 장거리 선로 운전시 손실이 낮은 HVDC 송전은 환경문제로 인한 민원으로 새로운 선로건설을 위한 부지확보가 전 세계적으로 어려운 실정이다. 이 문제를 해결할 수 있는 방안으로 기존의 AC선로에 DC를 적용하여 동일철탑에 AC와 DC 선로를 같이 설치하는 하이브리드(Hybrid) 선로가 제시되었다. 그러나 AC와 DC가 공존한 상태에서의 전기환경기준이 제시되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 국내에서 운용중인 345kV 2회선 철탑에 DC선로를 적용한 하이브리드 선로의 축소모델을 제작하였고, DC선로의 도체 구성별 하이브리드 선로의 이온류 특성을 시험하였다.

같이 나타낼 수 있다. 그러나 직류 송전선로의 축소계수는 코로나 방전이 발생하지 않는 코로나방전 임계전압 미만에서는 교류 송전선로와 동일한 조건이 되지만, 코로나 방전이 발생하는 코로나 전 방전 임계전압 이상에서는 이온 영향에 대한 효과를 고려하여야 한다.

1. 서 론

$$K_e = \frac{E_{\text{축소}}}{E_{\text{실제}}} = \frac{V_{\text{축소}}/h_{\text{축소}}}{V_{\text{실제}}/h_{\text{실제}}} = \frac{V_{\text{축소}}h_{\text{실제}}}{V_{\text{실제}}h_{\text{축소}}} = \frac{K_v}{K_f} \dots\dots\dots(3)$$

한편 지표면에서의 전하밀도  $\rho$ 는 식 (4)와 같이 나타낸다. 여기서  $\epsilon$ 는 유전율, E는 지표면 전계강도, A는 면적, V는 체적이다.

$$\rho = \epsilon E \times A / V \dots\dots\dots(4)$$

경제성 때문에 전력계통에 적용하기 어려웠던 HVDC(High voltage direct current) 송전은 최근 몇 년 동안 전력전자기술이 향상됨에 따라 HVAC(High voltage alternating current) 송전보다 기술적, 경제적으로 많은 장점을 갖게 되었다. 특히 주파수가 다른 계통을 연계하거나, 장거리 선로 운전시 HVAC 선로보다 많은 장점을 갖는다. 그러나 새로운 HVDC 송전선로를 건설하기 위한 선로부지 확보는 환경문제로 인한 민원 때문에 전 세계적으로 매우 어려운 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 현존하는 HVAC의 용지 범위 안에 새로운 HVDC 선로를 건설하거나 HVAC 선로를 HVDC 선로로 변환하는 방법을 채택하고 있다. 따라서 직류 송전선로를 교류선로 용지범위 안에 새로 설치하여 운전하는 방법과 기존의 교류선로용 철탑에 직류선로를 설치하는 방법이 주로 이용되고 있다. 이와 같이 교류 및 직류선로를 동일한 철탑에 설치하는 것을 하이브리드(Hybrid) 선로라고 한다. 하이브리드 선로의 운전은 전계강도, 코로나 임계전압, 코로나 전류 관점에서 교류 및 직류 도체 간에 상호작용을 유발시켜 지표면의 직류전계강도, 이온전류밀도, 교류 전계강도 등에 영향을 미친다. 상호작용은 인체에 대한 전기적인 충격(shock), 생물학적 영향 등에 관련되기 때문에 인체안전 및 건강 측면에서 중요한 문제가 될 수 있다. 또한 교류선로의 상용주파수가 직류선로에 영향을 미치고, 반대로 직류선로의 이온 등의 영향으로 교류선로에 고장이 발생될 수 있다. 따라서 하이브리드 선로를 건설하기 전에 하이브리드 선로의 형상, 적정 운전전압 등 다양한 요소별 전기환경 및 제반 현상에 관한 연구가 필요하다. 이러한 연구를 수행하기 위해 하이브리드 선로를 축소모델인 축소모델을 이용하여 단기간에 하이브리드 선로의 전기환경을 평가할 수 있다.

따라서 전하밀도의 축소계수,  $K_p$ 는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$K_p = \frac{\rho_{\text{축소}}}{\rho_{\text{실제}}} = \frac{\epsilon E_{\text{축소}} \times A' / V'}{\epsilon E_{\text{실제}} \times A / V} = \frac{E_{\text{축소}} V A'}{E_{\text{실제}} V' A} = \frac{K_e K_f^2}{K_e^3} = \frac{K_e}{K_f} = \frac{K_v}{K_f^2} \dots\dots\dots(5)$$

식 (5)로부터 지표면 이온전류밀도  $J$ 의 축소계수  $K_j$ 를 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$K_j = \frac{J_{\text{축소}}}{J_{\text{실제}}} = \frac{(k\rho E)_{\text{축소}}}{(k\rho E)_{\text{실제}}} = K_k K_p K_e = \frac{K_v^2}{K_f^3} \dots\dots\dots(6)$$

$K_k$ 는 이온 이동도의 축소계수로서 실선로와 축소모델선로의 이동도가 반드시 동일하지 않지만, 기상조건 등 한정된 조건들이 동일하다고 하면 이온의 이동도도 동일하게 되어( $K_k=1$ ) 식 (6)을 만족한다. 도체 코로나 전류는 지면에서의 이온전류밀도를 페넨지 A와 곱으로 표현할 수 있다. 따라서 코로나 전류의 축소계수,  $K_c$ 는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_c = \frac{I_{\text{축소}}}{I_{\text{실제}}} = \frac{J_{\text{축소}} A_{\text{축소}}}{J_{\text{실제}} A_{\text{실제}}} = K_j K_f = \frac{K_v^2}{K_f^2} \dots\dots\dots(7)$$

2. 본 론

2.1 축소모델선로의 축소계수

축소모델의 축소계수(scale factor)는 인가전압, 실험 공간, 도체 크기 등에 의해 결정되며, 축소모델의 1차원 기하학적 축소계수,  $K_l$ 을 식 (2.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_l = \frac{r_{\text{축소}}}{r_{\text{실제}}} = \frac{h_{\text{축소}}}{h_{\text{실제}}} = \frac{S_{\text{축소}}}{S_{\text{실제}}} \dots\dots\dots(1)$$

여기서 r은 소도체 반경, h는 선로의 높이, S는 소도체 간격이다. 또한 인가전압에 대한 축소계수  $K_v$ 를 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_v = \frac{V_{\text{축소}}}{V_{\text{실제}}} \dots\dots\dots(2)$$

초고압 교류 송전선로에서는 코로나 방전에 의한 이온의 영향이 지표면에까지 영향을 주지 못하기 때문에, 코로나 방전의 발생여부와 관계없이 인가전압과 지표면 전계강도의 관계는 코로나 발생이 없는 상태로 가정한다. 따라서 축소모델에서의 지표면 전계강도의 축소계수는 식 (3)과

2.2 축소모델선로 구성

축소모델선로는 345kV AC선로에 250kV의 HVDC선로를 추가하였을 경우를 모의하기 위하여 축소계수에 맞는 비율로 기존의 345kV AC 선로의 크기를 줄여 절연물로 제작하였으며, 다양한 조건의 전압을 인가하기 위하여 전압조절이 가능한 AC 및 DC 전류원을 사용하였다.



〈그림 1〉 축소모델선로

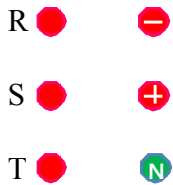
최상단 암의 높이가 약 1.8m 이내인 1/25 비율로 실제모델을 축소하는 것이 모의시험과 평가에 적합하다고 판단되어 축소계수를 0.04로 선정하였다. 축소모델에 이용되는 소도체는 현재 KS 규격에 따라 생산되

는 나전선 중 가장 작은 2.01mm 전선을 사용하였으며, 또한 축소계수에 맞게 등가반경을 축소하기 위해서 소도체 간격을 조정하여 소도체 형상을 축소하였다. 따라서 축소계수를 0.04로 하는 경우에 축소모델의 소도체 간격은 13.5mm가 된다. 그러나 소도체 1개의 경우 소도체 크기가 더 작아져야 하는 관계로 1/14.7의 비율로 축소하여 소도체 직경을 다른 2가지 구성과 동일하도록 설정하였다.

〈표 1〉 축소계수별 축소모델의 소도체 방식

도체 종류	RAIL 480 mm <sup>2</sup>		RAIL 480 mm <sup>2</sup>		RAIL 480 mm <sup>2</sup>	
소도체 수	4		2		1	
선로	실선로	축소모델	실선로	축소모델	실선로	축소모델
소도체 직경 (mm)	29.61	2.01	29.61	2.01	29.61	2.01
소도체 간격 (mm)	400	13.4	400	9.3	-	-
등가직경 (mm)	382.65	15.29	153.9	6.1	29.61	2.01
축소 계수	1	1/25	1	1/25	1	1/14.7

소도체 방식에 따른 지표면 전계강도 특성을 조사하기 위하여 선행연구 결과 가장 낮은 전기환경장해가 발생하였던 중성선(하단), +극(중단), -극(상단) 극배치로 선로를 구성하였다.



〈그림 2〉 최적 선로 극배치

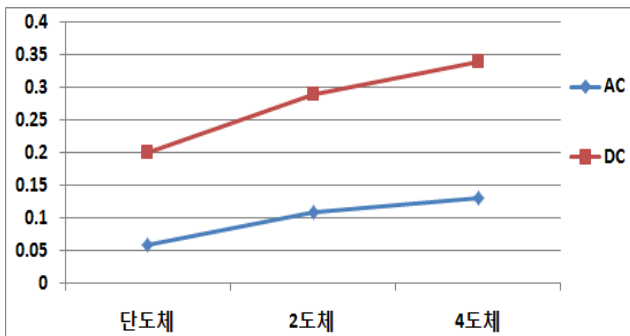
### 2.3 시험결과

시험을 통해 측정된 데이터는 표 2의 환산계수를 사용하여 상용선로에서의 발생값으로 환산하여 분석하였다.

〈표 2〉 실선로 환산계수

축소모델 인가전압 [kV]	실선로 인가전압 [kV]	환산계수			
		전압	선형	전계강도	이온전류밀도
AC 23 DC ±16.7	AC 345 DC ±250	0.067	0.04	1.667	69.444

환산결과 그림 3과 같이 AC에 비해 DC선로 직하의 지표면 전계강도가 크게 나왔으며, 소도체의 수가 늘어날수록 AC 및 DC선로 모두 증가하였다. 이를 통해 인가전압 및 소도체수가 일정했던 AC선로의 지표면 전계강도가 증가한 것은 DC에 의한 것으로 추정된다.



〈그림 3〉 도체 구성별 지표면 전계강도

### 3. 결 론

345kV/±250kV Hybrid 선로의 축소모델 모의시험에서 지표면 전계강도는 소도체 수에 비례하고 AC선로가 DC선로의 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 향후 AC/DC 하이브리드 선로의 실선로 적용 시 운전 중인 AC선로에 대한 전기환경요소를 고려해야 함을 의미한다. 향후, 축소모델선로를 이용하여 DC 선로에서 발생하는 이온이 AC선로에 미치는 영향을 파악함으로써 실선로에 가까운 하이브리드 선로에서의 전기환경특성을 연구할 계획이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] K.Y. Shin, J.S. Lim, D.I. Lee, M.N. Ju, K.H. Yang, "Test on the Environmental Characteristics of HVDC Overhead Transmission Line Using Reduced-scale Model", 16th International Conference on Electrical Engineering, July 11-14, 2010.
- [2] Sebo, S.A. Kasten, D.G. Zhao, T. Zaffanella, L.E. Clairmont, B.A. Zelingher, S, "Development of reduced-scale line modeling for the study of hybrid corona", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1993. Annual Report, Conference, 17-20 Oct. 1993, Page 538-543.
- [3] Tiebin Zhao, Juan Illan, John M. Cohol, Robin D. Hinton, Stephen A. Sebo, Donald G. Kasten, "Design, Construction and Utilization of a New Reduced-Scale Model for the Study of Hybrid (AC and DC) Line Corona", Proceedings of the 1994 IEEE Power Engineering Society, 10-15 April 1994, Page 239 - 245.
- [4] Metwally, I.A., "Investigation of corona phenomenon for a reduced-scale model of hybrid AC and DC lines", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1996. IEEE 1996 Annual Report of the Conference, Volume 2, 20-23 Oct. 1996 Page 610 - 613.