

국내 가공송전선로 절연설계기술의 발전 및 적용

유철환, 김경호, 박순규  
한국전력공사 중앙교육원

Progress and application on the insulation design of overhead transmission line in Korea

Chol-Hwan Yoo, Kyeong-Ho Kim, Soon-Kyu Park  
CEI, KEPCO

**Abstract** - Main power transmission network in Korea is consist of 154kV, 345kV transmission lines. Also 765kV transmission lines are on construction currently.

There are some differences in the insulation design concept, methods and contents on 154kV, 345kV and 765kV overhead transmission lines respectively.

In this paper, we described and summarized the applied insulation design concept, methods and features on each transmission lines.

1. 서 론

우리나라 송전망은 154kV 및 345kV급 송전선로가 주축을 이루고 있으며, 현재 765kV 송전선로가 건설중에 있어 머지않아 765kV 계통이 상용운전될 전망이다. 그런데 각 송전전압의 도입시기가 달라 그간에 절연설계기술 및 기법상의 발전이 있었고, 전압레벨의 차이에 따라 절연체의 섬락특성도 다르게 나타나므로 송전전압에 따라 그 절연설계방법 및 내용에 있어서 다르게 적용되어 왔다.

본 논문에서는 이와 같은 국내 가공송전선로에 적용된 절연설계의 발전 및 적용내용에 대해 송전전압별로 고찰해 보고자 한다.

2. 본 론

2.1 154kV 송전선로 절연설계

154kV 송전선로는 일제시대인 1935년에 최초로 도입된 이후 송전용량의 증대 필요성으로 인해 선종 및 지지물 규모 등에 있어서 많은 변화를 거쳐 현재의 보편화된 선로인 선종 ACSR 410 × 2B의 2회선 수직배열방식에 이르게 되었다.

절연설계 측면에서는 최초 도입당시의 설계근거가 남아 있지 않으나, 현재 적용기준에 의하면 내오손 설계는 연면거리방식을 사용하였고, 뇌과전압 설계는 IKL 20 및 「1건이하/100km/년」의 목표사고율을 적용하였으며, 그 내용은 다음과 같다.

2.1.1 소요애자수량 결정

- 적용애자(현수형 자기애자)[ESB131]
  - 애자직경 및 높이 : 254 × 146 mm
  - 연면거리 : 280 mm

- 상용주파과전압 절연설계(연면거리방식)

상정등가염분 부착밀도(mg/cm <sup>2</sup> )	A지역	B지역	C지역	D지역	
	0.003- 0.063	0.063- 0.125	0.125- 0.25	0.25- 0.5	
공칭전압 1kV당 소요누설거리(mm)	19.1	22.9	25.4	28.0	
소요애자 수량(개)	현수	11	13	14	16
	내장	10	12	13	14
비 고	내장장치는 내오손성능10% 고려				

- 개폐과전압 절연설계
  - 목표 50%섬락전압 : 591.5 kV
  - 계통최고허용전압 : 170 kV
  - 개폐과전압배수 : 2.8
  - 기상보정계수 : 1.1
  - 내압계수 : 1.15
  - 공극계수 : 1.15
  - 과전압계수 : 1.05
  - 파형계수 : 1.1
- ▷ 소요애자수량 : 7개

- 뇌과전압 절연설계
  - 목표사고율 : 1건이하/100km/년
  - 애자의 표준충격파 50%섬락전압( V<sub>50%</sub> )
  - 애자 9개 : V<sub>50%</sub>(1.2×50μs) : 860 kV
  - 역섬락전류(애자 9개) :

$$I_L = \frac{k}{L} \frac{V_{50\%} - E_m}{(K - C)Z_T} = 80.5 \text{ [kA]}$$

- E<sub>m</sub>(계통최고 대지전압 파고치)
- k(4×5μs 파형계수):1.18(파두)×1.25(파미)
- L(기상보정계수) : 1.1
- K(철탑내 전위상승율) : 1
- C(가공지선과 전력선 결합율) : 0.3
- Z<sub>T</sub>(철탑정부의 전위상승 임피던스) : 18 Ω
- 적용 IKL : 20
- 예상 사고율 : 0.99 건/100km/년
- ▷ 소요애자수량 : 9개

- 오손지역별 결정된 애자수량

지역구분	청정지역	A지역	B지역	C지역	D지역
현수	9 (10)	11	13	14	16
내장	10	10	12	13	14

\* 아킹혼 설치시 최소애자수량 : 10개

2.1.2 공기절연간격 결정

- 선간거리 계산

- 수평선간 거리

$$Ch_1 = 1.5 + \frac{V}{1.1 \cdot K_1} = 6.2 \text{ [m]} \text{ (표준경간)}$$

$$Ch_2 = 0.625\sqrt{D} + 0.021 \cdot V = 7.0 \text{ [m]} \text{ (장경간)}$$

- 수직선간거리

$$Cv_1 = 1.0 + \frac{V}{1.1 \cdot K_2} = 3.8 \text{ [m]} \text{ (표준경간)}$$

$$Cv_2 = 2.0 + \frac{V}{1.1 \cdot K_3} = 4.3 \text{ [m]} \text{ (장경간)}$$

- V : 사용전압(kV)
- D : 40℃ 무풍시 이도(m)
- K<sub>1</sub> : 정수(30)
- K<sub>2</sub> : 정수(50)
- K<sub>3</sub> : 정수(60)

○ 대기 공기간격 및 횡진각

절연간격구분	표준	최소	이상시	아킹혼	
이격거리[mm]	1400	900	390	1120	
횡진각	현수장치	20°	60°	-	-
	내장장치	15°	40°	-	-

2.1.3 가공지선 차폐각 및 절탑접지저항

- 가공지선 차폐각 : 5° (2조), 30° (1조)
- 접지저항 : 15 [Ω] 이하

2.2 345kV 송전선로(4도체) 절연설계

1975년 최초로 준공된 345kV 송전선로는 2도체 선로로서 현수예차규격 254×146mm(연면거리 318mm)의 애자를 사용하고, 뇌과전압설계시 목표사고율은 154kV 선로와 같으나 IKL을 30으로 상향 적용하였으며, 아킹혼 간격을 2340mm로 결정하여 사용하였다.

그후 현재 보완화된 4도체 송전선로를 개발함에 따라 사용애자의 규격이 달라지게 되나 송전선로 절연레벨을 2도체선로와 일치하는 것이 합리적이라는 판단에 의거 다음과 같이 설계되었다.

2.2.1 소요애자수량 결정

- 적용애자(현수형 자기애자)(PS 131-570~573)

애자규격	S-3-1	S-4-1
애자직경.높이[mm]	280×170	320×195
누설거리[mm]	370	460

- 상용주파과전압 절연설계(연면거리방식)

지역구분	A지역	B지역	C지역	D지역	
공칭선간전압 1kV당 소요연면거리(mm)	17.8	21.6	22.9	26.7	
소요애자 수량(개)	현수(S-3-1)	17	21	22	25
	내장(S-4-1)	14	17	18	21

- 개폐과전압 절연설계

- 2도체선로 아킹혼 간격 : 2340 mm
- 적용 혼능률 : 75 ~ 80%
- 애자런 소요길이 : 2925 ~ 3120 mm
- ▷ 소요애자수량 : 18개(S-3-1), 15개(S-4-1)

- 뇌과전압 절연설계

- 목표사고율 : 1건이하/100km/년
- 적용 아킹혼 간격 : 2340 mm
- 혼간 표준충격과 50%섬락전압(1×40μs)  
: 1367 kV ( V<sub>50%</sub> = 0.55 ℓ + 80)
- 역섬락전류 :

$$I_L = \frac{k}{L} \frac{V_{50\%} - E_m}{(K-C)Z_T} = 98.9 \text{ [kA]}$$

- 적용 IKL : 30
- 예상 사고율 : 0.88 건/100km/년
- 적용혼능률 : 75 ~ 80%
- ▷ 소요애자수량 : 18개(S-3-1), 16개(S-4-1)

- 오손지역별 결정된 애자수량

지역구분	청정지역	A지역	B지역	C지역	D지역
현수(S-3-1)	18	18	21	22	25
내장(S-4-1)	16	16	17	18	21

2.2.2 공기절연간격 결정

- 선간거리 계산(154kV 적용식 참조)

구 분	수평선간거리(m)	수직선간거리(m)
표준경간	12	7.3
장경간	11.1	7.3

○ 대기 공기간격 및 횡진각

절연간격구분		표준	최소	이상시	아킹혼	
이격거리[mm]		2700	2200	800	2340	
횡진각	현수	A.SF	15°	40°	-	-
		F	20°	45°	-	-
	내장	15°	35°	-	-	

2.2.3 가공지선 차폐각 및 절탑접지저항

- 가공지선 차폐각 : 0° (2조)
- 접지저항 : 20 [Ω] 이하

2.3 765kV 송전선로 절연설계

우리나라 765kV 송전선로는 세계최초의 2회선 수직 배열방식으로 외국의 수평배열방식과의 상이점 등으로 인해 일본의 1000kV 송전선로(2회선 수직배열)의 절연설계방식을 참고로 하였으나, 자체적으로 섬락특성식을 개발하여 실증시험을 거친 것이다.

154kV 및 345kV 송전선로와 다른 점은 오손지역구분상 청정지역을 I, II로 세분한 점, 개폐과전압 설계시 애자장지별, 섬락경로별 공극계수를 적용한 점, 아킹혼 능률을 상향 적용한 점 등이며, 뇌과전압 설계시 선로의 중요도를 감안 목표사고율을 「0.35건/100km/년」으로 낮추고, 낙뢰침입각 확률분포함수와 대기경사각을 고려한 자체프로그램을 개발 이용하였으며, 또한 표준절연간격 결정시 자체 실증시험식을 적용하였다.

다음은 실증시험을 거쳐 결정한 설계내용이다.

2.3.1 상용주파과전압 절연설계

- 적용애자(현수형 자기애자)(IEC)

애자규격	CA509EB (300kN)	CA596EA (400kN)
애자직경.높이[mm]	320×195	340×205
누설거리[mm]	460	525

- 오손지역별 소요애자수량(오손내전압방식)

구 분	청정 I	청정 II	A지역	B지역	C지역	D지역	
등가염분 부착밀도	0.01 이하	0.01- 0.03	0.03- 0.063	0.063- 0.125	0.125- 0.25	0.25- 0.5	
내전압	300kN	19.5	15.0	12.9	11.2	9.6	8.5
	400kN	20.5	15.8	13.6	11.8	10.1	9.0
소요 애자 수량	300kN	29	37	44	50	58	66
	400kN	28	36	41	48	55	62

- 내전압 목표치 :  $V_w = \frac{V_m}{\sqrt{3}} \times 1.2 = 555 \text{ [kV]}$
- V<sub>m</sub> : 계통최고허용전압(800 kV)
- 1.2 : 상용주파 과전압배수

- 공기절연간격(실증시험결과)

- 섬락특성식 :  $V_{50\%} = k \cdot 950 \cdot \ln(0.57 d + 1)$
- $V_{50\%} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot V_m \cdot K_1 \cdot K_2$  (대지간)
- k : 섬락경로별 공극계수  
1.26(도체-도체), 1.44(도체-도체)
- d : 공극거리[m]
- K<sub>1</sub> : 기상보정계수(1.165 : 교류, 1000m이하)
- K<sub>2</sub> : 내압계수(1.099 : 교류, 1000m이하)

2.3.2 개폐과전압 절연설계

- 공기절연간격(실증시험결과)

- 섬락특성식 :  $V_{50\%} = k \cdot 950 \cdot \ln(0.57 d + 1)$
- $V_{50\%} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot V_m \cdot n \cdot K_1 \cdot K_2$  (대지간)

- n : 개폐과전압계수(1.9 : 대지간)
- k : 애자장치별, 섬락경로별 공극계수
- K<sub>1</sub> : 기상보정계수(1.082 : 개폐, 1000m이하)
- K<sub>2</sub> : 내압계수(1.176 : 개폐, 1000m이하)

○ 소요애자수량

- 혼간격(m) :  $d = \frac{1}{0.57} (e^{\frac{V_{gas}}{k \cdot 950}} - 1)$
- 적용 혼능률(η) : 80~83%
- 애자수량(N) :  $N = \frac{d}{\eta \cdot T}$
- T : 애자높이(mm)

2.3.3 뇌과전압 절연설계

- 목표 사고율 : 0.35건 이하/100km/년
- 차폐실패사고율

$$n = N \int_{I_{o_{min}}}^{I_{o_{max}}} P(I_o) r_{ss} \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\sin(\theta - \alpha)}{\cos \alpha} \cdot f(\alpha) \cdot d\alpha \cdot d\theta \cdot dI_o$$

- N(대지뇌격밀도) : 2[회/100km/년]
- P(I<sub>o</sub>) : 뇌격전류분포
- $P(I_o) = 4.75 \cdot e^{-I_o/20} + 0.1 \cdot e^{I_o/50}$
- r<sub>ss</sub>(뇌격유인거리) :  $r_{ss} = 6.72I_o^{0.8}$  [m]
- α : 낙뢰침입각
- f(α) : 낙뢰침입각 확률분포함수
- $f(\alpha) = k_m \cdot \cos^m \alpha$

$$k_m = \frac{1}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^m \alpha \cdot d\alpha}, m=3$$

- θ : 대상 상도체의 낙뢰로부터의 노출각
- I<sub>o</sub> : 뇌격전류[kA]
- I<sub>omin</sub> : 임계뇌격전류[kA]
- I<sub>omax</sub> : 완전차폐가 되는 한계뇌격전류[kA]

○ 역섬락 사고율

$$P(n) = N \int_0^\infty \int_{\theta_{ni}}^{\theta_{ns}} P(I_o) \cdot \delta P(n) \cdot f(\alpha) \cdot dI_o \cdot d\theta$$

· δP(n) : 뇌격전류 I<sub>o</sub>, 뇌격각 α의 뇌격이 n상에 포착되는 비율

○ 공기절연간격 [표준절연간격]

$$l = 1.11 \cdot Z \quad (Z : \text{아킹혼 간격})$$

2.3.4 절연설계 결과

○ 소요애자수량

구 분	청정 I	청정 II	A지역	B지역	C지역	D지역	
소요애자 수량(개)	300kN 400kN	29 28	37 36	44 41	50 48	58 55	66 62

○ 아킹혼 간격

- 현수애자장치 : 4800 [mm]
- 내장애자장치 : 4600 [mm]

○ 공기절연간격

구 분		1,000m 이하	1,000m 초과	비 고	
표준 절연 간격 (mm)	현 수	애자런혼(ℓ <sub>1</sub> ) 5,330	5,330		
	V 조	애자런혼(ℓ <sub>1</sub> ) 5,110	5,110		
	내 장	애자런혼(ℓ <sub>1</sub> )	5,110	5,110	
		점퍼혼(ℓ <sub>1</sub> )	5,150	5,150	
		점퍼깊이(ℓ <sub>0</sub> )	5,840	5,840	점퍼내혼 미사용시
		점퍼내혼(ℓ <sub>6</sub> )	4,600	4,600	점퍼내혼 사용시
최소 절연 간격 (mm)	현 수	도체~하단암 ℓ <sub>2</sub>	3,650 (4,150)	3,740 (4,270)	
		도체~탑재 ℓ <sub>3</sub>	4,950	5,090	
	V 런	도체~하단암 ℓ <sub>2</sub>	4,650 (5,020)	4,770 (5,170)	
		도체~탑재 ℓ <sub>3</sub>	4,880	5,020	
		도체~상단암 ℓ <sub>6</sub>	4,590 (4,880)	4,710 (5,020)	
	내 장	도체~하단암 ℓ <sub>2</sub>	4,430 (4,880)	4,550 (5,020)	
		도체~탑재 ℓ <sub>3</sub>	4,950	5,090	
	이상시 절연간격 ℓ <sub>4</sub> (mm)		1,850	1,930	
	상간 절연간격 ℓ <sub>5</sub> (mm)		8,420	8,640	
	주) ( )는 사각압의 경우				

○ 적용 횡진각

- 표준절연간격 : 15° (현수), 5° (내장)
- 최소절연간격 : 20° (현수), 15° (내장)
- 이상시절연간격 : 60° (현수), 40° (내장)

○ 가공지선 차폐각 : 0° (2조)

○ 접지저항 : 20 [Ω] 이하

3. 결 론

이상으로 우리나라 가공송전선로의 절연설계방법 및 적용내용에 관해 고찰하였다.

154kV 및 345kV 송전선로의 경우 내오손설계는 연면거리방식을 적용하였으며, 뇌사고율 목표치를 「1건이하/100km/년」으로 설계하였다.

765kV 송전선로의 경우 내오손설계는 오손내전압방식을 적용하였으며, 공기절연간격은 국내 연구결과 및 765kV 시험장의 실증을 통해 얻은 섬락특성식을 이용하였으며, 뇌과전압설계는 계통의 중요성을 감안 일본 1000kV 송전선로의 신뢰도 수준에 해당하는 「0.35건이하/100km/년」의 사고목표치로 하여 자체 개발한 프로그램에 의해 설계하였다.

765kV 송전선로의 경우 향후 상용운전을 통해 설비 신뢰도 분석 등의 검증과 함께 절연설계 적용기술의 피드백 과정이 필요하리라고 생각한다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전력공사 설계기준, "154kV 절연협조기준", 1991
- [2] 한국전력공사, "建設誌(345kV 초고압설비)", 1979
- [3] 한국전력공사, "345kV 4도체 송전선로 설계검토", -
- [4] 심용보 외 7인, "765kV 계통절연 협조연구", 한전전력연구원, 1995
- [5] 심정운 외 16인, "765kV 송전선로 공기절연거리 실증연구", 한전전력연구원, 1996
- [6] 한국전력공사, "한국전기 100년사(상권)", 1989