

한전 765 kV 송전선로의 절연설계

구 본득, 원 영진, 황 정일
한국전력공사 송변전처 송전전압격상추진반

Insulation design for KEPCO 765kV Transmission Lines

B.M. Koo, Y.J. Won, J.I. Hwang
UHV Project office, T/S Dept., KEPCO

Abstract - KEPCO is now promoting the new project of upgrading its highest system voltage from 345kV to 765kV. The main reason of this project is an insurance of bulk power transmission from power complexes at coast to power demand center at Kyoung-In area. The new system needs a careful approach to basic design to secure its reliability and to reduce the increase of investment cost. So, We introduced the basic philosophy of insulation design in spring meeting of this transaction. This paper, after preceding paper, deals with the insulation design example for 765kV transmission lines.

1. 서론

한국전력공사에서는 송전전압 격상계획에 의거, 현행 송전선로 최고운전전압인 345 kV를 765 kV 로 격상하는 사업을 수행 중에 있다. 765 kV 송전은 대용량 전력수송을 목적으로 하고 있으므로, 높은 신뢰성이 요구된다. 송전선로 절연설계는 송전선이 자연환경에 노출되어 있으므로, 이들 자연환경에 의한 영향 및 계통내외부의 과전압을 검토하여 적절한 수준의 선로 신뢰성이 유지될 수 있도록, 소요절연간극, 탐각접지저항 및 차폐각등을 결정하여야 하는 바, 본 논문은 지난, 방전 및 고전압 연구회 발표⁽¹⁾에 이어, 765 kV 송전선로의 절연설계실례에 관하여 논하였다.

2. 송전계통의 과전압 검토

송전선로의 합리적인 절연설계를 위하여는, 대상송전선로에서 과전압별로 발생가능한 최대과전압의 크기, 과전압의 선로거리별 분포, 발생확률등에 관하여 검토하고, 이를 기본으로, 전기적인 절연설계가 이루어져야 한다. 송전선로의 과전압은 상용주파수 영역의 상용주파성과과전압과 써지영역의 개폐과전압 및 뇌과전압이 있다. 이 중, 전력계통의 상태와 무관하게 발생하는 뇌과전압은 실제적인 크기를 상정하기 곤란하므로, 확실적인 방법에 의한 뇌과전압에 대한 절연 검토에서 다루고자 하며, 본 장에서는 전력계통의 상태와 밀접한 관계를 갖는 상용주파교류과전압과 개폐과전압에 관한 검토^(1,2)를 위주로 목표내전압치의 결정 방향에 관하여 다루었다.

검토대상선로로는 동해안축 발전소- 신태백변전소-신가평변전소를 연결하는 40km+150km의 가칭 동해안선로(모델2)와 당진발전소-신서산변전소-신안성변전소를 연결하는 40km+100 km의 가칭 서해안선로(모델1) 각각에 대하여 검토하였다.

2.1 송전선로 절연설계 목표 과전압 배수 검토

각 과전압별 검토결과를 요약하면 다음 <표 1>과 같다.

표 1 과전압 검토결과 요약

Table 1 Summary of over-voltage study

분 류		발생최대과전압(p.u)				
		40km 선로		150km 선로		
상용주파과전압	건전상	1.02				
	전위상승	1.12				
과전압	1선지락	1.01				
	2선지락	1.11				
개폐과전압	투입과전압		1.45		1.58	
	재투입과전압		1.45		1.59	
	차단과전압	차단저항 무 유	3G30	1G30	3G30	1G30
			1.8	1.67	1.86	1.84
			(3.28)	(2.65)	(3.36)	(2.73)
			차단저항 유		1.38	
지락과전압		1.78 (2.27)				
주	상용주파과전압 1 p.u : $\frac{800}{\sqrt{3}}$ (kV)					
	개폐과전압 1 p.u : $\sqrt{2} \times \frac{800}{\sqrt{3}}$ (kV)					
	재투입시 잔류전압 0.8 p.u					
	투입저항, 차단저항 : 300 - 900 (ohm) ()는 상간전압					

2.2 상용주파과전압 배수 선정 검토

지락시 건전상 전위상승이 최대 때의 지락고장에 의한 일시과전압 상승⁽¹⁾을 분석하면, 공장 40km 선로와 150km 선로의 일시과전압상승의 차는 0.1 p.u정도로 나타났다. 이 결과를 볼 때, 상용주파과전압에 대한 배수는 <표 2>에 보였듯이, 제 1방안은 일률적으로 1.2 p.u를 적용하여 설계 및 시공의 단순화를 꾀하는 방법이 있었으며, 제 2방안으로, 과전압배수를 선로구장별로 즉, 40km 선로는 1.1 p.u, 150km 선로는 1.2 p.u로 차등적용하는 방안이 있겠다. 제 2방안을 적용할 경우, 40 km 선로의 많은 부분이 염해오손 B 및 C 지역에 해당되므로⁽³⁾, 제1방안에 비하여 내부애자로 3 - 4 개 정도 줄일 수 있으므로(3 장 참조) 시공상의 경제성을 도모할 수 있겠다.

표 2 상용주파과전압 배수 적용 방안

Table 2 Cases for choosing PFOV level

방 안	상용주파과전압 배수	
	40 km 해당 선로	150 km 해당선로
제 1 방안	1.2 p.u (555 kV)	1.2 p.u (555 kV)
제 2 방안	1.1 p.u (510 kV)	1.2 p.u (555 kV)

2.3 개폐과전압 배수 선정 검토

차단기에 투입저항만을 고려한 경우, 선로거리 및 해발고도 별 발생가능한 개폐과전압의 크기는 다음 <그림 1>과 같다.

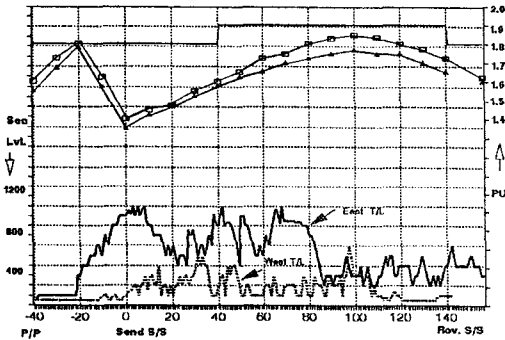


그림 1 송전선로의 거리별 표고분포 및 개폐과전압
Fig 1 Lateral profile of SOV and Sea-level along the route

<그림 1>을 분석한 결과, 개폐과전압 배수 선정 방안을 <표 3>에 정리하였다.

표 3 개폐과전압 배수 적용 방안
Table 3 Cases for choosing SOV level

방 안	개폐과전압 배수(p.u)	
	40km 해당선로	150km 해당선로
대지간 과전압	제 1 방안	1.9
	제 2 방안	1.8, 1.9
	제 3 방안	1.8, 1.9(차동)
상간 과전압	3.5	

제 1 및 제 2 방안의 경우, 전반적으로 신뢰성은 높으나, 40km 해당선로 및 150km 해당선로의 일부구간은 과절연설계되므로, 경제성을 저감시키는 요소가 있다. 제 3 방안의 경우는 제 1 및 제 2 방안과 비교할 때 신뢰성은 약간 저감되나, 경제성 면으로는 유리한 방안이다. 송전선로 표고 차이에 따른 영향을 검토한 결과, 개폐과전압에 대한 gap의 섬락특성은, 동일한 gap 길이일 경우, 표고의 증가에 따라 감소하는 경향이 있다. 즉, 해발고도 800 m 때 1.9 p.u에 해당하는 gap 길이는 해발고도 1200 m 에서는 약 1.85 p.u 정도의 절연내력을 갖는다. 그러므로, 상기 제 3 방안을 적용할 경우, 해발고도에 따른 gap의 50 % 섬락전압을 구하여, 이에 적합한 과전압 배수를 적용할 경우, 800 m 기준 정도 때의 절연내력을 갖게된다. 개폐과전압배수 선정시 고려할 대상 표고는 경과지에비답사보고서를 참조한 결과^(4,5), 1200 m 와 800 m 정도면 적절할 것으로 조사되었다. 제 3 방안을 적용할 경우, 적용과전압의 분기점 선정은 추후 2LG2LD 및 신가평-신안성 연계를 상정한 검토결과를 참조하여야 할 것이다.

2.4 과전압검토 결론

<표 4>에 765 kV 송전선로 과전압 검토에 대한 결론으로, 상용주파과전압 및 개폐과전압에 대한 과전압 배수와 적용 해발고도를 요약하였다.

표 4 765 kV 송전선로 절연설계 적용 과전압 배수(안)

Table 4 Expected Over-Voltage for 765kV T/L insulation design

항 목	과전압 배수(p.u)	
	40km 해당선로	150km 해당선로
상용주파과전압	1.1	1.2
개폐	대지간	1.8, 1.9
	상간	3.5
해발고도	800 m, 1200 m	

3. 상용주파과전압에 대한 절연설계

3.1 검토방법

상용주파과전압에 대한절연설계의 주항목인 애자는 지역 및 기상조건의 영향을 받으며, 표면의 오손 및 적설 등으로 인하여 절연성능이 저하되는 특성이 있는 바, 이에 관하여 우선 자기애자를 대상으로 검토하였다. 애자의 내오손특성에 관하여는 오손측정방법, 자연오손특성 및 오손지역구분등에 관하여 검토하였으며, Clean-fog법등의 인공오손시험과 자연오손시험에 의한 섬락특성 및 애자련당 내전압특성등을 검토하여 소요애자수량을 산출하였다.^(6,7,8) 내장에자련은 적설시 섬락전압이 저하하게 되므로 적설지역 구분방법과 적설애자련의 섬락특성에 관하여 검토하였다.⁽⁶⁾ Gap의 섬락특성에 관하여는 CRIEPI 식을 사용하였다.

3.2 검토결과

<표 5>는 765kV 송전선로의 상용주파과전압절연설계 검토사례를 나타낸 것이며, 자기애자를 사용할 경우, 현재 한전 오손지역 구분 기준중 청정지역을 먼지오손지역 (ESDD 0.01 mg/cm² 이하) 및 AA 지역 (ESDD 0.03 mg/cm² 이하)으로 세분화 하는 것이 애자소요수량을 줄일 수 있어 경제성을 향상시킬 수 있으며, 적설지역 구분 신설이 필요하며, 단거리 구간 (40km 미만)은 지락시 건전상의 전위상승이 장거리 구간에 비하여 현저히 낮으므로 이를 검토에 반영하였다.

표 5 상용주파 과전압에 대한 절연설계

Table 5 Insulation design for PFOV

구 분	면적	AA	A	B	C	D	
		0.01	0.03	0.125	0.25	0.5	
일 반 지 역	300KN 보통	29	37	44	50	58	66
	400KN 보통	27	36	41	48	55	62
	300KN 내무	-	29	34	39	45	50
	400KN 내무	23	29	33	38	45	50
적 설 지 역	애 자 규 격			300KN	400KN	530KN	
	적설 I (50μs/cm)	m 당 내전압		71 kV/m			
		소 요 갯 수		41	39	33	
적 설 II (100μs/cm)	m 당 내전압		78.5 kV/m				
	소 요 갯 수		37	35	30		
공 기 절 연 거 리							
해 발 고 도				800 m	1200 m		
소 요 50% 섬 락 전압 (kV)				818	825		
이 상 시 절 연 간 격 (mm)				1790	1900		

4. 개폐과전압에 대한 절연설계

4.1 검토 방법

전력계통의 개폐과전압에 대한 절연설계시 검토사항으로는 개폐과전압의 섬락특성에 영향을 주는 각종 parameter, 애자장치, Gap등의 대지간, 선간섬락특성, 오손 및 적설애자련의 섬락특성과 개폐사고율 등이 있다. 개폐과전압의 섬락특성에 영향을 주는 요소로는 개폐과전압의 파형, 극성, Gap의 형상 및

기상상황등이 있다. 대기간 섬락특성은 Gap의 형상, Gap주위 물체배열등의 영향을 받으며, 선간섬락특성은 이 외에, 상도체간의 전압차, 상도체전압 파고치간의 시간차등에 영향받는다. 이들 Gap 및 애자련의 개폐과전압에 대한 섬락특성은 전압이 높아질수록 포화되는 경향이 있다. 송전선로 절연설계를 위한 자료는 애자련에 대한 단독시험만으로는 부족하고 실제의 사용상태를 모의한 실규모 첩탑모형에 애자장치를 취부하여 시험을 할 필요가 있다. 그러나 이에 대한 국내의 시험자료가 현재는 활용할 수 없는 실정이므로 본 검토에서는 외국의 시험결과를 이용하였다.^(6,9,10) 개폐사고율에 관한 검토는 지배과전압이 통계적변동을 갖지 않는 값이므로 본 검토에서는 생략하였다.

4.2 절연설계 조건

개폐과전압에 대한 절연설계는 아킹론 사용을 전제로, 다음과 같은 조건에 대하여 검토하였다.

표 6 개폐과전압에 대한 절연 검토 조건
Table 6. Study conditions for SOV

구분	검토조건
계통 최고 전압	800 KV
개폐과전압 배수	대지간 : 1.8 P.U, 1.9 P.U 상 간 : 3.5 P.U
표 고	800m 이하, 1200m 이하
적용 Gap Factor	CRIEPI 방법
적용 Horn 능률	85% 이하
적설 지역 구분	상용주파과전압과 동일

개폐 과전압에 대한 내전압표치인 소오 50% 섬락전압은 다음 식으로 구하였다.

$$V_{50} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times n \times K_1 \times K_2$$

여기서 V_{50} 은 계통최고전압, n 은 개폐 과전압배수, K_1 은 기상 보정계수로서 IEC 보정법을 적용하였으며, K_2 는 내압계수로 Gap의 V_{50} 로부터 -30 값을 적용하였다.

4.3. 개폐과전압 절연설계 소오 절연 산출

<표 7>과 <표 8>은 765kV T/L 의 개폐여지에 대한 소오애자 수량 및 소오공기절연거리(최소절연간격)를 산출한 예이다.

표 7 개폐과전압에 대한 애자수량
Table 7. Required insulator quantities for SOV

과 전 압 배 수		1.8 P.U			1.9 P.U			
애 자 규 격		300KN	400KN	530KN	300KN	400KN	530KN	
일 반 지 역	표 고 800 m	소오 V_{50}	1477kV			1560kV		
		Horn 내장	3490mm			3800mm		
		간격 현수	4270mm			4670mm		
		애자수	22	21	18	23	22	19
	표 고 1200m	소오 V_{50}	1515kV			1600kV		
		Horn 내장	3630mm			3960mm		
		간격 현수	4450mm			4880mm		
		애자수	22	21	18	24	23	20
		현수	27	26	22	30	29	24
		적 설 지 역	I	소오 V_{50} (kV)	1680 (1176/0.7)			1773 (1241/0.7)
		설계내전압	154 kV/m (220 × 0.7)					
		애 자 수	-	38	32	-	40	34
	II	소오 V_{50} (kV)	1470 (1176/0.8)			1552 (1241/0.8)		
		설계내전압	176 kV/m (220 × 0.8)					
		애 자 수	-	33	28	-	35	30

표 8 개폐과전압에 대한 공기절연거리
Table 8. Clearances for SOV

구분	Gap Factor	800 m		1200 m			
		1.8	1.9	1.8	1.9		
대지간개폐과전압	P.U	-	-	-	-		
	V_{50} (KV)	-	1477	1560	1515	1600	
현수 애자 장치	도체-상단암	-	1.19	4690	5150	4900	5380
	3각암	1.30	4060	4430	4230	4630	
		1.28	4160	4550	4340	4750	
	도체-탑체	-	1.24	4380	4800	4570	5010
내장 애자 장치	도체-상단암	-	1.31	4010	4380	4170	4570
	3각암	1.34	3860	4220	4020	4400	
		1.26	4270	4670	4450	4880	
	도체-탑체	-	1.24	4380	4800	4570	5010
변전소인입 인류애자장치		1.17	4830	5300	5040	5540	
상 간 개폐 과전압	P.U	-	3.5	3.5			
	V_{50} (KV)	-	2872	2945			
	이격거리	-	8230	8590			

5. 뇌과전압에 대한 절연설계

5.1 검토 방법

뇌격에 의한 송전선의 섬락사고는 그 현상을 명확히 규명하여 사고를 줄이기는 어려우므로, 뇌관측 Data를 이용하여 사고 확률을 계산한 후 사고실적과 비교, 보정함으로써 사고율이 목표사고율 범위 내에 오도록 내뢰대책을 강구하였다. 검토에는 IEEE의 뇌사고율 계산 Program "FLASH"(1984)를 기본으로 하여, 우리나라의 송전선로가 주로 산악지를 경과함을 감안, 대지경사각의 영향 및 경사각의 영향을 추가하였다.^(8,10,11) 가공지선 Arm길이(차폐각)의 변화, 아킹론 간격의 변화 및 접지저항의 변화에 대한 예측사고율 변화를 검토함으로써 목표사고율을 만족하면서 가장 경제적인 내뢰검토가 되도록 하였다. 또한 뇌에 의한 사고는 첩탑의 높이에 영향을 받으므로 기존 345KV 송전선로의 첩탑높이분포를 참조하여 765KV 이상 첩탑높이별 분포를 작성하고 각 높이별 사고율에 첩탑높이 분포율을 곱하여 전체 사고율을 계산하는 방법을 사용하였다.

5.2 뇌사고율 예측계산 방법

예측계산 순서는 다음과 같다.

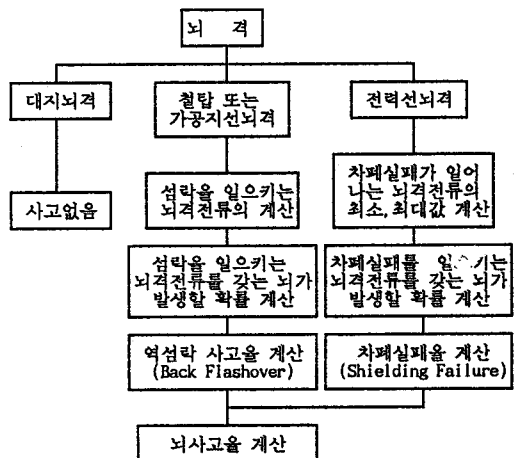


그림 -2 뇌사고율 예측계산 순서

Fig. 2 Flow chart for the calculation of LFOR

5.3 뇌사고율 계산 프로그램의 검증

뇌사고에 대한 예측계산 결과와 실적과는 차이가 생기며 이에 대한 검증을 위하여 765kV 선로의 예정경각각 인근을 통과하는 345kV T/L을 선정하여, 뇌사고율을 예측계산한 결과와 전체 345kV T/L의 뇌사고 실적을 비교하였다. 345kV T/L 뇌사고율 예측계산에 사용된 전선, 철탑, IKL, 대지경사각, 탑각접지저항 등의 data는 실제의 것을 사용하였으며, 계산결과 0.979 회/100km/year로 나타났다. 한전통계⁽¹²⁾를 참조하면 345kV 송전선로의 뇌추정사고실적은 '77-'92년까지 0.74회/100km/year로 나타났으므로, 이 값과 Flash 프로그램의 결과치를 비교한 결과, 보정계수는 다음과 같았다.

$$\text{보정계수} = \frac{\text{실적치}}{\text{계산치}} = \frac{0.74}{0.98} = 0.755$$

5.4 765 kV T/L의 뇌사고율 예측계산

765 kV 선로 뇌사고 예측계산의 전제조건은 다음과 같다.

표 9 765kV 선로 뇌사고율 예측계산 전제 조건

Table 9. Assumptions for the calculation of LFOR

항 목	조 건
연간 뇌우일수 (IKL)	20
철탑	실제예측형상
전 력 선	ACSR 480" × 6B (Cardinal)
가 공 지 선	OPGW 200"
경 간	450 m

<그림 3>는 계산에 사용된 765kV 철탑높이분포를 하단암 높이 기준으로 나타낸 것이다.

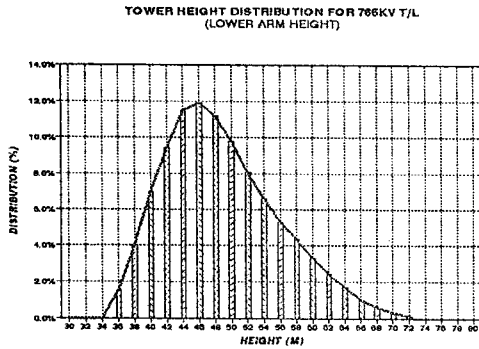


그림 3 765kV T/L의 예상 철탑높이 분포도
Fig. 3 Estimated distribution of 765kV tower height

탑각접지저항은 전체선로에 대한 분포를 가정하여 뇌사고율을 예측계산하고 그 결과를 Feedback하여 적절한 뇌사고율이 되는 분포값을 선정하는 방법을 사용하였다. 아킹혼의 간격은 애자련에 대한 허용률(85% 이하) 및 최소 혼간격에 의해 결정되며 이들에 대하여 뇌사고율을 검토하여 적절한 혼간격을 선정하는 방법을 사용하였다. 내장장치의 경우 Jumper내 혼간격을 적용하였으며 이 때 내장 애자련의 허용률을 초과하지 않도록 하였다. 소요차폐각을 최상단전력선과 가공지선이 이루는 각으로 가정하고, 0° ~ -10° 까지의 차폐각에 대한 차폐실패율을 검토하여 적정 차폐각을 선정하는 방법을 사용하였다. 뇌사고율의 목표치는, 한전 345kV와 일본 500kV는 1회(회/100km/year), 일본 1000kV는 0.33(회/100km/year)인 점 과, 765kV 송전선로의

중요성을 감안하여 IKL 20 일 때, 0.4(회/100km/year)를 유지하도록, 아킹혼의 최소간격을 검토하였다. <그림 4> 및 <그림 5>는 차폐각 및 아킹혼 간격변화에 따른 뇌사고율을 계산한 것이다.

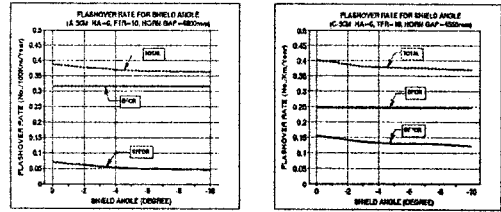


그림 4 차폐각변화에 따른 뇌사고율
Fig. 4 Shielding angle vs. LFOR

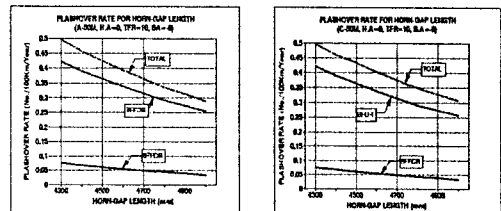


그림 5 아킹혼 간격 변화에 따른 뇌사고율
Fig. 5 Arcing-horn gap vs. LFOR

다음<표 10>은 765kV 선로의 뇌사고율을 예측계산한 결과이다.

표 10 765 kV T/L 뇌사고율 예측계산
Table 10. Estimated LFOR for 765kV T/L

구 분	차폐실패	연설락	합 계	비 고
현수철탑	0.156	0.377	0.533	아킹혼간격: 4600mm
내장철탑	0.239	0.317	0.556	차 폐 각: -8°
평 균	0.199	0.347	0.545	현수:내장 = 50:50
보정결과	0.150	0.262	0.412	보정계수: 75.5 %

5.5 765 kV 송전선로의 내뢰설계

이상의 결과를 종합하면, 765kV T/L의 뇌과전압에 대한 절연설계검토는 <표 11>과 같다.

표 11. 765kV 송전선로의 내뢰설계 검토
Table 11. Insulation design study for Lightning

항 목	내 려 설 계	검 토		
차 폐 각	- 8° (현수: 1.7m, 내장: 1.9m 창출)			
탑 각 접 지 저항	10Ω 기준			
섬 락 경 로	내 장 장 치	현 수 장 치		
	Jumper Horn	애자련 Horn		
최 소 Horn 간격	4600 mm	4600 mm		
Horn 능 륜	85 % 이 하			
소 요 애자랑	300 KN	400 KN	530 KN	
	내 장	28	27	23
	현 수	28	27	23
최 소표준 절연간격	적용방법	1.1152 + 0.021 (Z: Horn 간격(m))		
	절연간격	내 장 철탑	현 수 철탑	
		5150 mm	5150 mm	

6. 결론

본 논문에서는, 765kV 송전선로의 합리적인 절연설계를 위한 일례로서, 각 과전압에 대한 소요에자수량 및 절연간극등에 관하여 검토하였다. 소요에자수량은 적용 과전압배수 및 오손 지역별로 상용주파과전압에 필요한 수량, 개폐과전압 및 내뢰 설계상 필요한 수량을 종합적으로 비교하여 선정하여야 하며, 먼지오손 이외의 지역은 상용주파과전압 절연에 필요한 에자수가 압도적으로 된다. 소요공기절연거리는 과전압배수, 해발고도의 영향을 받으며, 특히 표준절연간격은 혼간격에 따라 크게 변화하므로, 에자런길이가 어느 범위에 들도록 에자를 선정하는 것이 경제적이 된다. 이후, 합리적이고 신뢰성 있는 송전선로 절연설계를 위하여는, 과전압배수 선정 및 사고상정범위에 관한 검토, 오손지역구분을 위한 오손도 측정, 에자런의 절연내력 등에 관하여 보다 구체적이고 다양한 검토가 요구된다. 아울러, 송전선로의 신뢰성 예측을 위한 각종 사고율에 관한 검토가 요구된다.

[참고문헌]

1. 구본득 외, "한전 765kV 송전선로 절연설계의 기본방향", KIEE 방전 및 고전압 연구회(춘계), 1994. 5
2. 한전기술연구원, "765kV 계통 절연협조에 관한 연구(중간보고서)", 1994. 3
3. 한전송변전건설처, "765kV신당진-신서산 T/L답사보고서", 1993
4. 한전송변전건설처, "765kV신서산-신안성 T/L답사보고서", 1993
5. 한전송변전건설처, "765kV신태백-신가평 T/L답사보고서", 1993
6. CRIEPI, "UHV 송전계통의 절연(절연부회보고서)", 1984
7. NGK, Rev. -51, NGK
8. SEDIVER, "Toughened glass insulator", 1990
9. EPRI, "Transmission line reference book 345 kV and above", 1982
10. Hileman, "Insulation coordination"
11. IEEE, "IEEE Design guide for improving lightning performance", 1992
12. 한전계통운용처, "보호계전기 동작상태 분석보고서(1971~1992)"