

765 kV 송전철탑 개폐섬락 특성

심정운^o, 장성철, 곽주식, 김정부
한전전력연구원 765kV송변전그룹

Switching Surge Flashover Characteristics of 765 kV Transmission Towers

J.W.Shim^o, S.C.Chang, J.S.Kwak, J.B.Kim
KEPRI 765kV Transmission & Substation Group

Abstract

The breakdown Process in large gaps is greatly influenced by the gap geometry. Therefore full scale test are essential for the economical and reliable air insulation design. For switching surge design of 765 kV double circuit transmission line KEPRI is carrying the verifying tests using impulse voltage generator at Gochang test site. In this paper, the intermediate results of verifying tests are presented and the switching surge design criteria of 765 kV transmission tower flashover paths are discussed.

1. 서론

개폐장치에 대한 송전선로의 적정한 설계는 계통전압이 높아짐에 따라 그 중요성이 경제성 측면과 신뢰성 측면에서 매우 중요한 요소로 대두된다. 일반적으로 계통전압이 UHV 급이 되면 철탑 구조물의 섬락전압은 이격거리가 증가하는 것에 직선적으로 비례하여 증가하지 않고 구조물의 기하학적인 형상 및 대기조건에 따라 섬락전압이 크게 변한다. 섬락 특성식이 수많은 연구원들에 의해 제안되었지만 위에서 서술한 이유로 어떤 형상의 철탑에도 일반적으로 적용할 수 있는 신뢰성 있는 섬락특성식은 아직까지 도출된 바 없이 실제 사용할 철탑형상의 모의에 의한 실증실험을 통하여 공기절연거리를 결정하여야 한다. 갈수록 심화되는 철탑부식 및 경과지 확보의 어려움으로 인해 내용량 송전의 일환으로 향후 건설될 장거리 송전선로의 송전전압을 765 kV로 저상하기로 결정함에 따라 한전전력연구원은 765 kV 2회선 수직배열 송전선로 철탑의 개폐임펄스 섬락특성 실험을 96년부터 고창시험장의 실험설비를 이용하여 시행하고 있다. 현재까지 봉-평판 및 현수예장장치 철탑에 대한 실험을 완료하였고 현재 내장장치 철탑의 개폐임펄스실험이 진행 중에 있다. 본 논문에서는 현재까지 완료된 봉-평판, 765 kV 송전선로의 현수예장장치 철탑 및 내장예장장치 철탑에 대한 개폐임펄스 섬락실험결과에 대하여 기술하고 실험결과를 토대로 하여 765 kV 철탑의 개폐과전압에 대한 대기간 최소절연거리 산출식 및 섬락경로별 대기간 최소절연거리를 제시하고자 한다.

2. 봉-평판 실험결과

송전선로의 철탑의 공기절연거리는 봉-평판 전극의 섬락특성식을 기본으로 하여 각 피시물의 공극계수(k)를 구하여 산출한다. 공극거리 8 m까지의 모든 공극의 50% 개폐임펄스 섬락전압은 봉-평판의 50% 섬락전압에 비례한다는 것이 보고된 바 있고 UHV 급 개폐장치에 대한 절연설계는 봉-평판의 섬락특성식에 공극계수를 적용하여 절연거리를 산출하는 것이 일반적인 경향이다.

그림 1은 봉-평판의 각 거리에서의 임계섬락전압을 나타내고 있다. 그림 1의 점선은 본 실험의 봉-평판의 실험결과로 실선으로 표시된 일본 전력중앙연구소(CREIP)의 실험식 $V_{50} = 1080 \ln(0.46 D + 1)$ 과 거의 유사한 섬락특성을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 실험식 (1)을 765 kV 송전철탑의 최소절연거리 산정을 위한 기본식으로 사용하고자 한다.

$$V_{50} = 950 \ln(0.57 D + 1) \quad (1)$$

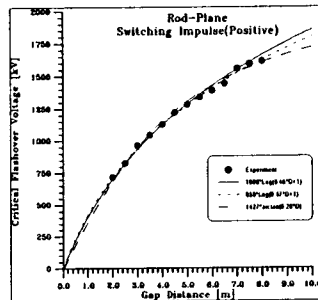


그림 1 봉-평판 개폐임펄스 섬락특성

3. 현수예장장치 철탑 실험결과

절연거리 산정을 위한 실험에서 무엇보다 중요한 것은 공극의 형상으로 실제 사용할 지지물 및 금구류의 형상을 모의하는 것이다. 본 실증실험에서는 실선로에 사용할 금구류를 이용하여 피시물을 구성하고 모의탑체 및 모의암을 이용하여 바림에 의한 전선 및 금구류의 횡진(0°, 20°)을 모의하였다. 현수예장장치 철탑의 개폐충진전압 시뮬레이션 실험항목은 아래의 표 1과 같다.

표 1 현수예장장치 철탑 실험내용

Gap geometry		Angle	공극거리 D(m)	D/d	파두장
도체-탑체		0	3.9, 4.4, 4.9, 5.9	1.40, 1.34, 1.29 1.36, 1.23 1.30, 1.22, 1.21 1.19, 1.17	50-500μs
		20	3.9, 4.4, 4.9, 5.4		
도체-삼각하부암	삼각하부암	0	4.0, 4.53, 4.9, 5.4		
		0	4.0, 4.65, 4.9, 5.4		
아경혼		0	-		
		20	-		

3.1 도체-탑체간 개폐과전압 섬락특성 실험

도체-탑체간 개폐과전압의 섬락특성을 구하기 위한 피시물은 현수예장장치의 기울기가 0, 20°가 되도록 설치하였고 도체와 탑체간의 간격은 모의탑체를 이동시켜 조정하였다. 섬락경로를 도체-탑체간으로 한정하기 위해 도체-탑체간을 제외한 다른 섬락경로의 간격은 적정히 조정하여 도체-탑체간의 간격이 다른 섬락경로의 간격에 비해 최소가 되도록 하였다. 그림 2는 파두장 변화에 따른 각 이격거리에서의 파두특성으로 임계파두장 이하의 영역에서는 섬락전압이 감소하다가 임계파두장 이상에서는 섬락전압이 증가하는 전형적인 파두특성

을 잘 나타내고 있다. 그림 3은 횡진각 0°, 20° 일 때의 이격거리변화에 따른 임계섬락전압의 변화를 나타내며 이때의 공극계수(k)는 각각 1.27, 1.24 이다.

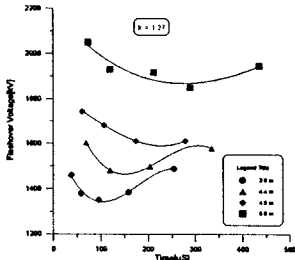


그림 2 도체-도체간(0° 횡진) 파두특성

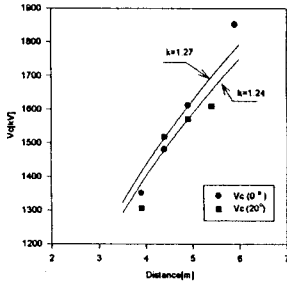


그림 3 횡진각 0°, 20° 인 도체-도체 피사물의 임계섬락특성

3.2 도체-하부암간 개폐과전압 섬락특성

도체-하부암간의 섬락특성실험은 765 kV 송전선로에 사용할 삼각, 사각암을 모의한 피사물에 대하여 각각 시행하였다. 이격거리는 현수예자련과 도체를 상하로 이동하여 조정하였다. 섬락경로를 도체-하부암간으로 한정하기 위해 도체-하부암의 간격이 다른 섬락경로의 간격에 비해 최소가 되도록 하였다. 그림 4는 이격거리에 변화에 따른 임계섬락전압의 변화를 나타내며 이때의 공극계수(k)는 삼각, 사각하부암에 있어서 각각 1.48, 1.37 이었다.

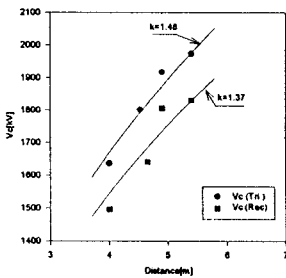


그림 4 도체-하부암 이격거리 변화에 대한 임계섬락특성

3.3 현수예자련 아킹혼 실험

아킹혼 실험은 횡진각 0°, 20° 에 대하여 실시하였다. 아킹혼간의 거리는 예자 개수를 증감시켜 조절하였다. 예자 개수는 24, 27, 30, 33, 36개의 300kN 2륜을 시험조건으로 하였다. 섬락경로를 아킹혼간으로 한정하기 위해 아킹혼간의 간격이 다른 섬락경로의 간격에 비해 최소가 되도록 하였다. 그림 5는 D(아킹혼-암간거리)/d(아킹혼간거리)에 따른 공극계수(k)의 변화를 나타내며 곡선의 식은 식 (2)와 같다.

$$k = 2.14 \cdot \exp\left(\frac{-0.59}{D/d}\right) \quad (2)$$

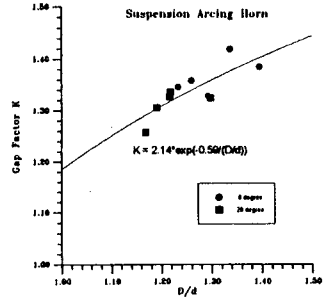


그림 5 현수예자련 아킹혼의 공극계수(k)의 변화

4 내장에자장치 철탑 실험

내장에자련의 실험은 이미 확정된 철탑 skeleton과 갈도록 실험철탑에 모의 도체 및 모의암을 제작하여 부착한 상태로 실험을 진행하였다. 탑체폭은 내장철탑의 최대 탑체폭인 6.5M, 삼각암은 암끝단 폭을 1.5 M, 탑체폭을 6.5M, 사각암은 암끝단 및 탑체폭을 6.5 M로 각각 제작하였다.

내장에자련의 실험을 위하여 사용한 급구류 및 조립식 점퍼장치는 전력연구원이 생산기술과제로 개발한 제품을 사용하였다. 내장에자장치 실험항목은 표 2와 같다.

표 2 내장에자장치 철탑 실험내용.

Gap geometry	Angle	공극거리 D(m)	D/d	파두장
점퍼깊이	0	4.5, 5.0, 5.52, 5.67		50-1000/μs
	30	4.61, 5.0, 5.48, 5.6		
도체-탑체	30	4.4, 4.9, 5.4, 5.9		
도체-하부암	삼각	3.6, 4.0, 4.4, 5.1		
	사각	4.3, 4.8, 5.3, 5.8		
아킹혼		미완료		

4.1 도체-상부암(점퍼깊이) 개폐과전압 섬락특성 실험

본 실험은 상부암과 점퍼도체간에서는 섬락이 일어나지 않는 점퍼깊이를 구하기 위한 실험으로 예자련의 아킹혼간 거리는 4.56 M로 일정하게 유지하고 점퍼깊이를 변화시키면서 섬락경로를 관찰하였다.

실험데이터는 점퍼깊이(D)/아킹혼간격(d)에 대한 점퍼-상단암간의 섬락확률이 0%, 100%인 경우를 제외하고 누적확률분포함수로 해석하여 섬락이 아킹혼간으로 일어날 확률이 98% 일 때의 점퍼깊이를 최소 길이로 산정하였다. 분석결과 점퍼최소깊이는 수평각 0°, 30° 일 때 각각 5620mm, 5850mm로 확인되었다.

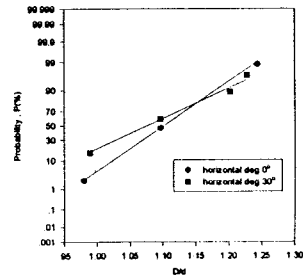


그림 6 점퍼깊이(D)/아킹혼간거리(d) 변화에 따른 아킹혼간 섬락확률

4.2 도체-탑체간 개폐과전압 실험특성 실험

실험을 위한 모의탑체는 765 kV 송전선로에 사용할 철탍과 유사하게 파이프로 모의탑체를 제작하여 모의하였고 모의탑체는 전후로 움직일 수 있도록 설치하여 점퍼-탑체간 거리를 조정할 수 있도록 하였다.
그림 7은 이격거리 변화에 따른 임계섬락전압을 나타내고 있다. 시험 결과 공극계수(k)는 1.24이었다.

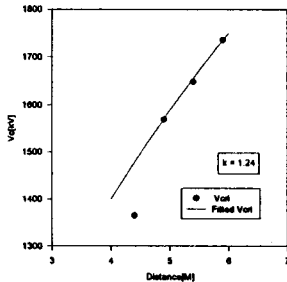


그림 7 도체-탑체 이격거리 변화에 따른 임계섬락전압의 변화

4.3 도체-하부암간 개폐과전압 실험특성

하부암은 765 kV 송전선로에 사용할 철탍과 유사하게 파이프로 모의암을 제작하여 모의하였다. 점퍼-모의암간의 거리조정은 점퍼도체의 길이로 조정하였다.
본 실험은 점퍼도체와 삼각 하부암간의 실험특성을 고찰하여 점퍼-하부암간의 최소절연거리를 구하기 위한 실험으로 점퍼 최외측 도체-하부암간의 거리를 변화시키면서 파두장 50~1000μs에 대하여 실험을 시행하였다.
그림 8은 이격거리 변화에 따른 임계섬락전압을 삼각, 사각암에 대하여 각각 나타내고 있다. 실험결과 공극계수(k)는 삼각암 1.32, 사각암 1.25 이었다.

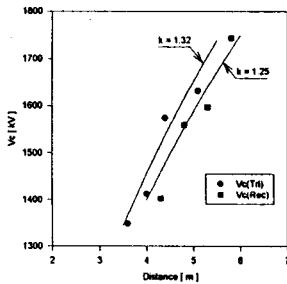


그림 8 도체-하부암간 이격거리 변화에 따른 임계섬락전압의 변화

5. 섬락경로별 최소절연거리

EMTP 및 TNA 모의 결과 765 kV 계통의 대지간 개폐과전압 배수는 1.9로 확인되었고 개폐과전압에 대한 소요 50% 임계섬락전압은 식 (3)과 같이 구한다.

$$V_c = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times V_m \times n \times K_1 \times K_2 \quad (3)$$

$$V_c = k \cdot 950 \ln(0.57 D + 1) \quad (4)$$

여기서 V_m 은 계통최고전압(800 kV), n 은 개폐과전압배수(1.9), K_1 은 기상보정계수(1.08), K_2 는 내압계수(1/0.85)이다. 식 (3)에 의하여 계산된 765 kV 송전선로의 50% 임계섬락전압은 1580 kV 이다.

표 3은 전력연구원 이 시행한 봉-평판의 임계섬락전압식 (1)

과 각 섬락경로별 섬락실험에 의하여 산출된 공극계수(k)의 결합식 (4)에 의하여 산출한 최소공기절연거리와 외국의 실험자료를 근거로 하여 작성한 "765 kV 송전선로 절연설계지침(잠정)"의 최소공기절연거리를 비교하고 있다.

이 실험결과를 비교하여 보면 일본 UHV 실험식을 이용한 잠정기준에 비하여 현수형에서는 공기절연거리가 짧아지는 반면 내장예자장치에서는 최소공기절연거리가 길어지고 있다. 내장형 예자장치에 대한 플라이어스 다이어그램을 그려보면 도체-하부암간의 최소절연거리는 표준절연간격(5,150 mm, 5° 횡진시) 및 도체-탑체간의 최소절연거리(4,950 mm, 15° 횡진시)에 의한 원의 반경 내에 위치하므로 철탍의 형상에는 영향을 미치지 않는다.

단 도체-탑체간의 최소절연거리가 50mm 늘어나게 되지만 철탍제작시의 여유분이 있으므로 사용에는 지장이 없을 것이다. 점퍼도체-상부암간의 최소절연거리는 아키텐 미사용시 최소 1.27d(d: 아키텐간거리)인 것으로 실험결과 확인되었다.

표 3 섬락경로별 최소공기절연거리

구분		Gap Factor	최소절연거리	비고
현수예자장치	도체-하부암	삼각	1.48(1.30)	3660(4530)
		사각	1.37(1.28)	4200(4650)
	도체-탑체	-	1.24(1.24)	4860(4900)
	Arcing Horn Gap	-	1.31(1.26)	4500(4800) D/d 고려 1.2인 경우임
내장예자장치	도체-하부암	삼각	1.32(1.34)	4450(4310)
		사각	1.25(1.26)	4900(4770)
	도체-탑체	-	1.24(1.24)	4950(4900)
	도체-상부암	0°	-	5620 혼간거리4600 점퍼내혼 미적용시
	30°	-	5850	

- 주 1. 해발고도 1000m 이하 기준, 절연거리의 단위는 mm임
- 2. () 의 값은 설계값임
- 3. 내장예자장치 도체-상부암거리(점퍼길이)는 아키텐간 거리 가 4600mm일 때 혼간에서의 섬락확률이 98%인 경우임

4. 결론

실증실험을 통하여 지금까지 축적된 실험결과에 의하여 산출된 개폐과전압에 대한 765 kV 송전선로철탍의 대지간 공기절연거리는 설계값과 다소 차이가 있지만 결정적으로 철탍의 형상을 변경해야 될 만큼의 큰 차이는 아닌 것으로 판명됨에 따라 외국의 실험자료를 근거로 하여 작성한 "765 kV 송전선로 절연설계지침(안)"에 대한 신뢰성이 확인되었다.

96년 11월까지 계속되는 실증실험을 통하여 본 논문에서 제시되지 않은 섬락경로의 개폐과전압에 대한 대지간 최소공기절연거리를 산출하고 뇌섬락경로 고정실험을 하여 대지간 표준절연거리를 산출함으로써 765 kV 송전선로 철탍에 대한 공기절연거리 실증실험은 완료된 것으로 기대가 되지만 추가로 현재 사용여부를 검토중인 점퍼내혼을 사용할 경우의 도체-상부암간 최소절연거리 산출실험과 아키텐 미적용시의 공기절연특성실험이 시행되어야 하고 실험항목 중 미진한 부분에 대하여 보충실험이 요구된다.

참고문헌

- [1] J.B Kim, J.W Shim, J.M Kim, "Air Clearance Test in a Full Scale Tower for 765 kV Double Circuit Transmission Line", Proc. of Korea-Japan Symposium on Elec. Elec. Discharge and High Volt. Eng. pp 133-138, 1996
- [2] 電力中央研究所, "UHV送電線の氣中絶縁フラッシュ特性(第3.4報)", 電力中央研究所報告, pp 1-33, 1-22, 1984
- [3] 한국전력연구원, "765 kV 송전선로 공기절연거리 실증연구", 중간보고서, pp 50-70, 1995
- [4] 한국전력연구원, "765 kV 계통절연 협조연구", 최종보고서, pp 102-109, 1995
- [5] 한국전력공사 송변전지, "765 kV 송전선로 절연설계 지침 및 해설서", pp 7-11, 1994
- [6] S.A Annestrand, J.J LaForest, L.E Zaffanella, "Switching Surge Design of Towers for UHV Transmission", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS 90, pp 1598-1603, 1971