

765kV 송전선로 활선작업을 위한 불량애자 발생 유형별 전기적 섬락특성 분석

이형권 손흥관 박민영 박인표 김효진
 한국전기연구원 한국전기공사협회

Flashover Characteristics of Damaged Insulator Strings for Live-line works in 765kV T/L

Lee, H.K. Shon, H.K. Park, M.Y Park, I.P. Kim, H.J.
 KERI KECA

Abstract - The 765kV transmission line will be maintained by live-line works for efficient operation. In order to maintain the 765kV transmission lines safely by live-line works, linemen have to know flashover characteristics of the insulator strings with damaged insulators. This paper suggests flashover characteristics of the 765kV insulator strings from experimental test results directly.

1. 서 론

송전선로에서 전기적인 절연을 담당하는 애자는 매우 중요한 송전설비 중의 하나이다. 활선작업 내용을 살펴보면 많은 부분이 손상된 불량애자를 교체하는 작업을 할 수 있으며, 활선작업자가 손상애자를 교체하기 위해 애자런에 접근하는 경우가 많다. 애자런에서 애자가 손상을 받게 되면 손상된 애자 주변의 절연성능이 저하하게 되고, 절연성능이 저하된 애자런에 활선작업자가 애자 교체를 위해 접근하게 되면 활선작업자가 위험한 상황에 노출될 수도 있다. 이러한 이유로 활선작업을 하는데 있어 불량애자 발생 유형별 애자런의 섬락특성 파악이 중요하다. 또한 765kV 송전선로 운영측면에서는 운영과정에서 애자런에 불량애자가 발생하였을 때, 유지보수 여부를 판정할 수 있는 기준이나 기술적 근거가 필요한데, 이런 측면에서도 불량애자의 수량이나 발생 위치별 절연특성을 파악해둘 필요가 있다.

765kV 송전선로 운영 과정에서 활선작업자에게 가장 크게 영향을 미칠 수 있는 과전압 현상은 차단기 개폐동작 발생시 나타나는 개폐과전압이다. 활선작업시 작업자의 전기적 안전성 확보라고 하면 개폐과전압으로 인해 작업자에게 섬락현상이 발생하지 않도록 하는 것이기도 하다. 결과적으로 활선작업과 관련하여 고려해야 할 전기적 섬락특성이라고 하면 개폐과전압에 의한 섬락특성을 의미한다.

따라서 본 논문에서는 국내 765kV 송전선로의 현수애자런에 대해 불량애자 발생 유형별 전기적 섬락특성을 실험적으로 분석하여 그 결과를 제시하였다.

2. 실험개요

· 개폐섬락 실험전압

일반적으로 개폐충격전압의 섬락특성은 파두장의 길이에 따라 달라지는데, 이러한 특성에 대해 봉대-평판전극을 예로 보면 그림 1과 같다.

그림 1에서 보는 바와 같이 개폐충격 50%섬락전압이 최소가 되는 파두장은 전극의 간격과 비례관계를 갖고 있다. 전극의 간격이 짧은 경우에는 파두장 변화에 영향을 받지 않지만, 전극의 길이가 길어질수록 파두장 변화에 따라 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다.

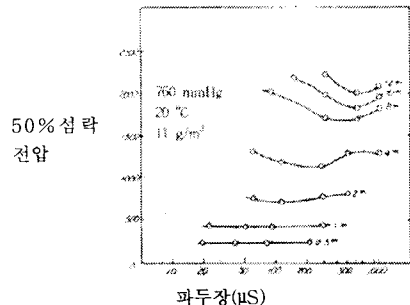


그림 1. 봉-평판전극의 개폐충격섬락전압과 파두장 특성(정극성)

일반적으로 개폐섬락전압은 정극성이 더 가혹한 조건이어서, 전극간 거리를 고려할 때 정극성을 만족하는 경우, 대부분 부극성도 만족하는 특성이 있다. 따라서 실험 전압의 전극은 정극성 전압만으로 실험하였다. 실험전압의 파두장은 전극간의 거리에 따라 달라지기 때문에 적정 파두장의 범위를 파악할 필요가 있다. 참고문헌[1]의 “765kV 송전선로 공기절연거리 실증연구”의 결과에서 현수애자런에 대한 섬락전압의 특성을 보면 그림 2와 같다.

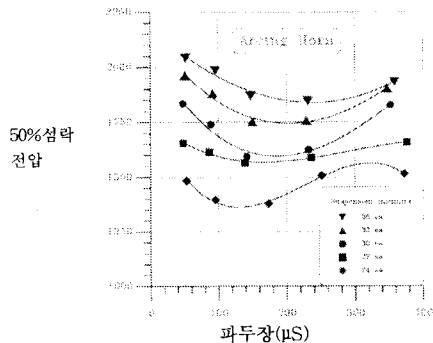


그림 2. 765kV 현수애자장치에 대한 섬락특성

그림 2에서 보는 바와 같이 애자장치의 50%섬락전압은 파두장에 따라 변화함을 알 수 있다. 765kV 송전선로에서 활선작업이 주로 애자장치 위치에서 많이 이루어지고, 활선작업시 전기적인 섬락특성이 중요한 곳은 애자장치가 된다는 점과 실험에 있어 고려되는 주요 절연 거리는 애자장치의 아킹온 간격과 애자런의 길이 범위가 된다는 점을 고려할 때, 실험전압의 파두장은 개폐임펄스

스의 표준파형인 250×2500μs로 인가하는 것이 적절하였다. 또한 상기와 같이 파두장을 정하여도 실험범위 내에서는 파두장에 따른 50% 섬락전압이 크게 차이나지 않을 것으로 보인다.

• 실험데이터 처리 및 보정

섬락특성을 얻기 위한 실험은 각 피서물에 승강법(Up-down method)에 따라 전압을 인가하였다. 즉 초기 인가전압을 V 로 시작하여 섬락이 발생하면 인가전압을 ΔV 만큼 감소시키고, 섬락이 발생하지 않으면 인가전압을 ΔV 만큼 증가시킨다. 이와 같은 방법으로 30회 실시하여 섬락되지 않은 횟수를 기준으로 50% 섬락전압 V_{50} 을 아래의 식과 같이 구하였다.

$$V_{50} = V_0 + \Delta V \left(\frac{\sum_{i=0}^k n_i \cdot n_i}{\sum_{i=0}^k n_i} \pm \frac{1}{2} \right)$$

여기서 V_0 : $i=0$ 에 해당하는 전압 (kV)

i : 인가한 전압을 $V_0 + i \cdot \Delta V$ 라 할 때의 정수 i

n_i : i 에 해당하는 전압에서 섬락이 발생한 횟수

n : 인가한 전압에서 정수 i 의 최대값

실험에 의해 얻어진 50%섬락전압 데이터는 표준대기 조건으로 환산해야 하며, 국제규격[IEC 60060-1]에서 제시하고 있는 표준 대기조건은 다음과 같다.

- 기준온도 : 20℃
- 표준기압 : 101.3 kPa
- 절대습도 : 11 g/m³

이와 같이 보정이 필요한 기상정보는 온도, 기압, 습도이며, 이들은 공기밀도 보정계수 k_1 과 습도 보정계수 k_2 를 이용하여 측정전압 U (kV)와 보정된 전압 U_0 (kV) 사이의 관계를 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$U = k_1 \cdot k_2 \cdot U_0 \text{ (kV)}$$

3. 불량애자 발생유형 및 실험조건

• 불량애자 발생유형

송전용 애자가 손상되거나 불량애자가 되는 경우를 과거 애자사고 실적을 토대로 보면 그림 3과 같이 원인별로 구분된다.

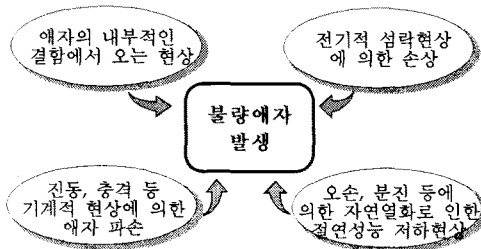


그림 3. 불량애자 발생 원인별 구분

그림 3과 같은 원인에 의해 나타날 있는 불량애자 발생 유형은 표 1과 같다.

• 불량애자 모의방법

본 논문에서는 불량애자를 다음과 같이 두 가지 형태로 모의하였다.

- 애자의 캡측(cap side)과 핀측(pin side)을 도전선으로 단락시켜 모의하는 방법[그림 4(a) 참조]
- 애자를 실제 파손시키는 방법[그림 4(b) 참조]

표 1. 불량애자 발생유형

구분	상태	주요 원인
애자련에서 애자손상 발생 유형	① 불특정 위치에서 한 두 개정도 손상되는 경우	- 제작 불량 - 기계적 충격
	② 애자련 전체의 애자, 또는 50% 이상의 애자가 손상 받는 경우	- 섬락사고 - 오손 - 기계적 충격

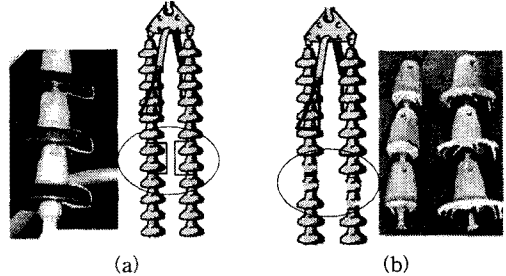


그림 4. 실험에서 불량애자 모의방법 예

그림 4에서 손상된 애자를 모의하기 위해 캡측과 핀측을 단락시키는 방법은 외국에서도 많이 적용하고 있는 방식 중의 하나로서 실제 애자가 파손되어 금구부만 남아 있는 경우보다 악조건이기 때문이다. 따라서 애자를 도전선으로 단락시키는 것만으로도 충분한 모의실험이 가능하며, 실험데이터를 적용하는 측면에서도 오히려 더 좋은 조건이라고 할 수 있다. 또한 실제 애자가 파손된 상황과 비교하기 위해, 애자를 실제 파손시켜서도 실험을 하였다.

• 불량애자 발생유형별 실험조건

이는 애자련에서 애자사고가 어떤 유형으로 나타날 것인가를 모의하는 방법으로서, 실선로에 발생할 애자사고는 매우 다양하게 나타날 수 있지만 표 1을 토대로 정하였다. 즉, 일정한 수량의 애자가 손상된 것으로 간주하고 애자련을 따라 위치별로 섬락특성을 파악하는 방법으로서 애자손상 유형별 실험조건을 표 2와 같이 정하였다.

표 2. 불량애자 발생유형별 실험조건

(a) 애자 단락상태		(b) 애자 파손상태	
L : 최하단 애자에서부터 애자수량		L : 최하단 애자에서부터 애자수량	
N : 단락애자수량 또는 파손된 애자수량		N : 단락애자수량 또는 파손된 애자수량	
(a)의 실험조건		(b)의 실험조건	
애자단락 수 N = 2, 3, 5, 10	애자파손 개수 N = 5, 10	애자단락위치 L = 0, 3, 6, 11, 16, 21, 28	애자파손 위치 L = 0, 3, 6, 11, 16, 21, 26
단락애자위치 : 2련 동시적용		단락애자위치 : 1련, 2련에 적용	

표 2의 실험조건 (a)에서 애자의 단락 개수를 2, 3, 5, 10으로 정한 것은 765kV 초고압 송전선로의 애자 사고 발생 예상건수를 고려 할 때, 이 정도 수량 구분이면 충분히 나머지 상황을 유추할 수 있을 것으로 고려했

기 때문이다. 또한 실험조건 (b)에서 애자파손 개수를 5, 10으로 정한 것은 실험조건 (a)의 결과와 비교를 위한 것이며, 더불어 실제상황과 동일한 조건에서 어떠한 추세로 섬락전압의 변화가 나타나는지를 파악하기 위한 것이다.

표 2의 실험조건 (a)에서 애자 단락 위치를 2련에 대해 동시에 적용하는 것은 실선로에서 발생하는 상황보다 더 가혹한 조건에서의 데이터를 얻기 위한 것이다. 실험조건 (b)에서는 애자 파손 상태를 1련에 대해 적용하기도 하고 2련에 대해서도 적용하는 것으로 고려하였다.

• 실험시료 및 설치조건

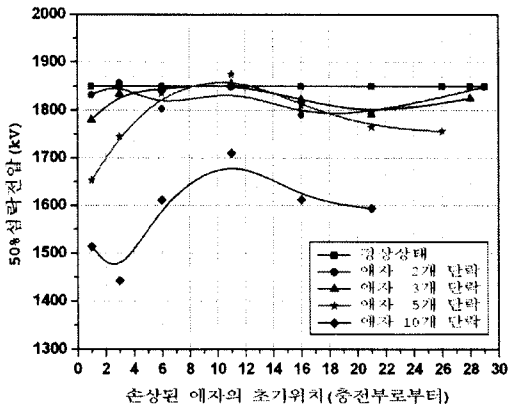
실험시료는 765kV 송전선로 청정I지역용 현수애자련으로 정하였다. 청정 I지역용은 애자련의 애자수가 가장 적기 때문에 실험을 하는데 있어서 가장 가혹한 조건이 된다. 애자장치를 설치하는데 있어서 실선로에 설치된 상태와 동일한 조건에서 실험을 하는 것이 의미가 있기 때문에 아킹링을 설치한 상태에서 실험하였다. 실험용 애자련의 설치조건은 다음과 같다.

- 애자장치 종류 : 청정 I지역용 2련현수 애자장치
- 아킹혼 설치유무 : 아킹혼 설치상태에서 실험함
- 아킹혼의 간격 : 4,800mm 기준
- 현수애자 종류 : 300kN 현수애자
- 애자련 애자수 : 30개 x 2련 = 60개

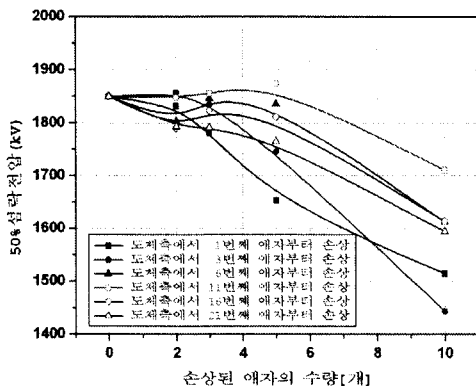
4. 실험 및 분석

4.1 애자를 단락시켜 모의한 경우 50%개폐섬락전압

불량애자 발생 모의조건별 실험결과를 요약하여 정리하면 그림 5와 같다.



(a) 불량애자 위치별 50%개폐섬락전압 특성



(b) 불량애자 수량별 5)5개폐섬락전압 특성

그림 5. 애자를 단락시켜 모의한 경우 실험결과 그래프

그림 5의 그래프로부터 실험결과를 분석하여 요약해 보면 다음과 같다.

- ① 아킹혼이 있어도 손상된 애자가 있으면 50%섬락전압은 낮아지는 것으로 나타났다.
- ② 손상된 애자수가 많을수록 50%개폐섬락전압은 낮아지는 특성을 보였다. 특히 손상된 애자가 5개와 10개인 경우 50%개폐섬락전압에 큰 차이를 보였다.
- ③ 손상된 애자의 위치는 전선 측에 있는 경우가 50% 섬락전압이 가장 낮아지는 것으로 나타났으며, 이로 부터 불량애자가 전선 측에 있을 때가 가장 조건이 좋지 않은 상황을 알 수 있다.
- ④ 손상된 애자가 애자련의 중간에 있을 때, 그리고 손상된 애자수가 5개 이하일 때는 50%개폐섬락전압이 정상상태인 경우보다 크게 낮아지지 않는 것으로 나타났다.
- ⑤ 손상된 애자의 위치는 전선 측에 있을 때 가장 낮아지고, 전선에서 멀어질수록 높아지다가 접지 측에 가까워지면서 다시 낮아지는 특성을 보였다.
- ⑥ 실험결과를 이용하여 불량애자의 발생 상황에 따라 애자련의 절연강도 저하 정도를 파악할 수 있어 애자장치의 유지보수 여부를 결정할 수 있는 선로운영 기초 자료로 활용성이 매우 클 것으로 기대된다.

4.2 애자를 파손시켜 모의한 경우 50%개폐섬락전압

애자를 직접 파손시켜 불량애자로 모의한 후, 역시 수량과 위치를 조정하여 다양한 실험조건을 구성한 후 50%개폐섬락 현상을 파악하였다. 주요 실험결과는 그림 6에서 그림8과 같다.

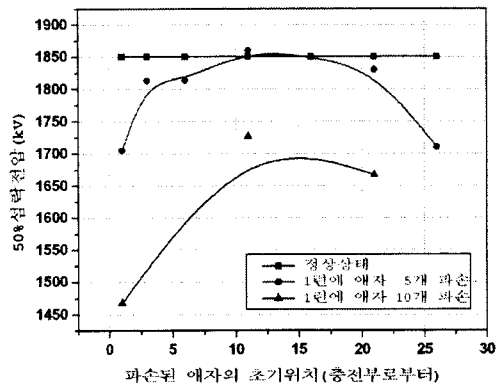


그림 6. 파손시킨 애자수와 위치별 50%개폐섬락전압

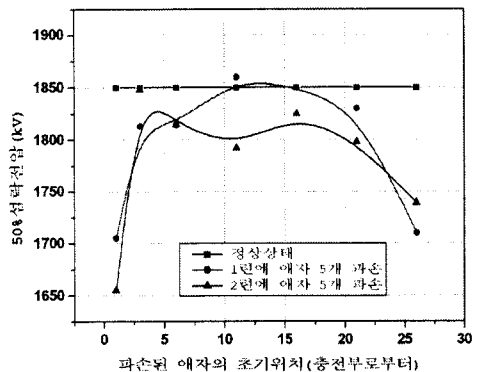


그림 7. 1련과 2련에 불량애자 적용시 50%개폐섬락전압

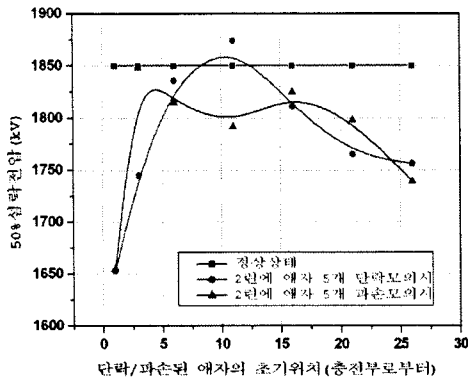


그림 8. 불량애자를 과손시킨 경우와 단락시킨 경우 50%개폐선타전압 변화추이

그림 6에서 그림 8로부터 실험결과를 요약해 보면 다음과 같았다.

- ① 아킹흔이 설치되어 있어도 애자의 과손상태에 따라 50%개폐선타전압이 변하는 것으로 나타났다.
- ② 과손된 애자가 애자련의 중간 위치에 있을 때 50%개폐선타전압이 크게 나타났다.
- ③ 과손된 애자가 전선 측에 있을 때가 가장 가혹한 조건이고 50%개폐선타전압도 가장 작은 값을 갖는다.
- ④ 과손된 애자가 1개의 애자련에만 있는 경우와 각 애자련에 위치한 경우를 비교해 볼 때, 1개의 애자련에만 있는 경우가 다소 높은 선타전압 값을 갖는 것으로 나타났으나, 전체적인 흐름으로 볼 때, 큰 차이는 없는 것으로 나타났다.
- ⑤ 불량애자 모의방법에 따른 선타특성을 파악해 본 바, 전선 측과 접지 측에 가까운 부분에서는 애자를 과손시켜 모의한 경우가 다소 높은 50%개폐선타전압을 갖는 것으로 나타났고, 애자련의 중간 위치에서는 오히려 단락시킨 애자련이 높은 50%개폐선타전압을 갖는 것으로 나타났다. 그러나 전체적인 변화추세에서는 단락시킨 경우와 과손시킨 경우 50%개폐선타전압에는 큰 차이가 없는 것으로 보였다.
- ⑥ 애자를 과손시켜 다양한 조건으로 모의한 경우의 50%개폐선타전압은 역시 선로 운영측면에서 기초자료로 활용성이 클 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 앞으로 765kV 송전선로에 적용될 직접활선작업의 안전성을 확보하는 측면에서 불량애자 발생 유형에 따른 개폐선타특성을 실규모급으로 실험하였고, 이의 결과를 그래프로 제시하였다. 또한 불량애자는 실선로에서 발생하는 것과 동일한 조건을 만들기 위해 애자간 단락시키거나 직접 과손시켜 모의하였다.

본 논문에서 제시한 실험결과는 765kV 송전선로를 운영하는 과정에서 유지보수의 필요성을 결정하는데, 긴요하게 활용될 것이며, 특히 직접활선작업을 하는데 있어 작업자의 접근 여부를 결정하는데 있어서도 매우 중요한 판단자료가 될 것이다.

앞으로는 현수애자련 뿐만 아니라 내장애자련과 V편장치에 대한 실험결과도 필요할 것으로 사려된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 765kV 송전선로 공기절연거리 실증연구, 한국전력공사, 1996. 11
- [2] 이형권, 김효진, “초고압 송전선로 직접활선공법 안전성 확보방안 연구”, 대한전기학회 하계 학술대회 논문지, 2004.7.14-16