

765kV 수직2회선 6도체 현수형 철탑에서 직접활선작업의 안전성 평가분석

論 文

57P-3-12

Analysis of Electrical Safety Level Test for Barehand Work at 765kV Vertical Double Circuit Six Bundle Conductors on the Suspension String Tower Type

金大湜[†]·韓相玉*
(Dae-Sik Kim · Sang-Ok Han)

Abstract - It has been issued that the necessity of Live line work for 765kV vertical double circuit six bundle conductors transmission line when the characteristics of transmission line, the composition of T/L and near the T/L circumstances etc. Others are considered. The Barehand method of UHV T/L is extremely dangerous work and especially it is directly related with lineman life so it is very dangerous. It should be performed several technology developments for live-line work on the UHV T/L, that should be considered such as the electrical influence on workers near the T/L, development of live-line facilities, guarantee of safety, the technical rules of live-line work, the safe method of live-line work and etc.

In order to maintain the 765kV transmission lines safely by barehand work, first of all, we should know the analysis of electrical safety level test in live-line work at 765kV vertical double circuit six bundle conductors on the suspension string tower type.

Key Words : 765kV Vertical Double Circuit, Six Bundle Conductors T/L, Barehand Method, Live- Line Work, Analysis of Electrical Safety Level

1. 서 론

국내 765kV 수직 2회선 6도체 송전선로에 대한 활선작업의 필요성은 선로운영 특성, 선로구성, 선로 주변여건 등 많은 부분을 고려할 때 필요 불가결한 사항임이 제기되 왔다. 초고압 송전선로의 활선작업은 매우 위험한 작업이며, 특히 인명과 직접적인 관련이 있기 때문에 위험성이 매우 크다. 초고압 선로에서의 활선작업을 위해서는 여러 가지의 기술 개발이 추진되어야 하는데, 즉, 송전선로 주변에서 작업자에게 미칠 수 있는 전기적인 영향, 활선장비의 개발 및 안전성 확보, 활선작업에 대한 기술적인 규정, 활선작업의 안정적인 공법 등 많은 기술들을 고려하여야 한다.[1]

활선작업과 관련한 일반적인 기술들이 이미 선진외국에 의해 많이 개발되어졌고 발표된 문헌들이 많이 있으나, 국내는 선로구성이 765kV 수직2회선 6도체 선로로서 선진외국과 다르고, 우리나라 선로환경과 전압에 적합한 기술사항들에 대한 검토가 없었기 때문에 외국의 기술을 그대로 도입

하는 것은 문제가 있다.

송전선로의 유지보수를 활선작업에 의해 수행하고 있는 미국, 캐나다, 유럽의 경우 활선작업의 안전성을 평가하는데 있어 단지 공기절연거리만으로 평가하는 경우가 대부분인데 활선작업자가 활선과 충분한 거리를 유지하면서 작업함으로써 안전성을 확보하는 방법이다. IEC의 최소접근거리 방법은 적용이 간단하고, 사고예측이 불필요하며 계수조정만으로 여러 상황에 대해 적용이 가능한 반면, 활선작업시간이나 안전성 평가와는 무관하고, 철탑형태와 선로길이 등 선로구성과도 무관한 점 등의 단점도 있으며, 주로 간접활선작업을 위한 적용기준이라 직접활선작업에 적용하기에는 어려움이 있다.[4][6][7]

이러한 문제점을 해결하고 보다 현실적인 안전성(safety level)평가를 위해 러시아에서는 섬락발생 확률과 섬락발생 시 작업자 위치에서의 섬락발생 확률 등을 산정하여 안전성을 평가한 사례가 있다.[5]

또한 국내 최초 765kV 송전선로 활선공법과 관련 장비 연구개발의 벤치마킹 대상이 러시아의 직접활선공법이 모태가 되었고, 러시아의 적용방법은 공법 하나하나에 대해서 개폐섬락전압에 대해 안전성을 평가하기 때문에 현실적으로 타당성이 있고, 객관적인 안전성에 대한 이해도 가능하기 때문에 본 논문에서도 이 방법을 적용하고, 실규모급 765kV 송전선로 직접활선작업에 대한 유형별 섬락특성 실험결과를 기본 데이터로 활용하여 765kV 수직2회선 6도체 선로 현수

* 正 會 員 : 忠南大學校 工大 電氣工學科 教授·工博

[†] 교신저자, 正會員 : 韓國電氣工事協會 技術政策研究員 先任研究員

E-mail: pinkfrog@keca.or.kr

接受日字 : 2008年 6月 11日

最終完了 : 2008年 7月 28日

형 철탑의 직접활선공법에 대한 전기적 안전성(safety level) 평가를 분석해 보고자 한다.

2. 765kV 수직2회선 6도체 현수형 철탑에서의 직접활선작업 대한 전기적 안전성 평가분석

2.1 직접활선공법의 안전성 평가방법 개념

본 논문에서 적용하게 될 개폐섬락전압에 대한 직접활선공법의 안전성 평가방법의 개념은 다음과 같다.[2]

개폐과전압에 대한 직접활선공법의 안전성은 작업자가 활선작업을 하는 동안 예상치 못한 개폐과전압의 발생 확률에 의해 결정될 수 있는데, 이를 수식화 하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$N = n_s \cdot P_{RD} \cdot P_F^* \quad (1)$$

여기서

N : 활선작업장에서 작업시 연간 개폐과전압 섬락 발생회수

n_s : 활선작업장에서 - 765kV 절연설계 기준압에서 연간 발생 가능한 개폐과전압 발생평균 회수

P_{RD} : 활선에 접근한 후 작업시간 [t]

$$P_{RD} = \frac{t_{RD}}{8700}, t_{RD} : \text{연간 작업시간}$$

P_F^* : 개폐과전압으로 인해 활선작업장에서의 섬락 발생 확률

식(1)에서 P_F^* 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_F^* = P_F \cdot [1 - P_{F,OHL}] \quad (2)$$

여기서

P_F : 활선작업장 자체에 대한 개폐과전압 섬락확률

$P_{F,OHL}$: 활선작업이 없는 송전선로에서의 개폐과전압 섬락확률

식(2)에서 P_F 를 계산하기 위해서는 개폐과전압 형태, 크기, 극성과 파두장(front duration), 풍속과 풍향, 활선작업장의 방전특성 같은 요소들을 고려하여 활선작업장에서 개폐과전압에 대한 P_F 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_F = \int_{-10}^{10} f(V) \int_0^{\infty} f(T_f) \int_{U_{ph}}^{\infty} f(U_{max}) \cdot \Psi_m(U_{max}, T_f, V) dU_{max} dT_f dV \quad (3)$$

여기서

$f(V)$: 풍속 10m/s 이하에서 활선작업장에서의 풍속분포
 $f(T_f)$ 와 $f(U_{max})$: 개폐과전압 파두장과 크기에 대한 분포

$\Psi_m(U_{max}, T_f, V)$: 여러 기상조건을 고려한 m개의

갭(gap)들 중에서 하나의 갭에서 섬락이 일어날 확률

애자런에서 풍속에 영향을 받는 것은 현수 애자런이다. 내장애자런과 V런장치는 풍속에 의한 영향이 거의 없다고 볼 수 있다. 따라서 내장애자런과 V런장치에 대해서는 상기 식이 다음과 같이 축약된다.

$$P_F = \int_0^{\infty} f(T_f) \int_{U_{ph}}^{\infty} f(U_{max}) \cdot \Psi_m(U_{max}, T_f, V) dU_{max} dT_f dV \quad (4)$$

활선작업장의 절연강도는 활선작업을 하지 않는 초기상태의 절연강도보다 다소 저하될 수 있으나, 송전선로 전체를 놓고 보면 섬락발생은 활선작업장 뿐만 아니라 다른 위치에서도 발생할 수 있다.[3] 이런 측면에서 본다면 송전선로 전체에 대한 절연강도는 갭 하나의 절연강도보다 낮아진다. 다시 말해서 송전선로 전체를 놓고 본다면 전선과 암간, 전선과 철탑주주재간, 아킹혼간 등 많은 갭을 생각해 볼 수 있다. 이렇게 무수히 많은 갭이 있는 것보다는 한 개의 갭이 있는 경우가 오히려 절연강도는 높다는 의미이다. 갭의 50%섬락전압과 표준편차 $\sigma_m (\sigma_m^* = \sigma_m / U_{50,m})$ 는 다음과 같은 관계로 나타내어진다.

$$U_{50,m} = U_{50,1} - z\sigma_1 = U_{50,1} \cdot (1 - z\sigma_1^*)$$

$$\sigma_m = \beta \cdot \sigma_1 \quad (5)$$

여기서 $z(z \geq 0)$ 및 $\beta(\beta \leq 1)$ 는 표의 값(tabulated coefficients)이다.

상기 식에서 내장애자런 및 V런장치에 대한 P_F 에 대해 $\Psi_m(U_{max}, T_f)$ 을 $U_{50,m}$ 과 σ_m 의 특성을 갖는 가우스분포로 나타내면 다음과 같다.

$$P_F = \int_0^{\infty} f(T_f) \int_{U_{ph}}^{\infty} f(U_{max}) \cdot F_G\left\{\frac{U_{max} - U_{50,m}(T_f)}{\sigma_m(T_f)}\right\} dU_{max} dT_f \quad (6)$$

여기서

$F_G(A)$: 가우스분포 표에서 얻어지는 값

$U_{50,m}, \sigma'_m$: m개의 병렬 갭에 대한 50% 섬락전압 및 표준편차

765kV 송전선로에서 활선작업을 하는 동안 발생될 수 있는 개폐과전압 중에서 임계파두장($T_{ft} \approx 500\mu s$)을 갖는 개폐과전압은 일반적으로 5%를 넘지 않는 것으로 알려져 있다. 즉 대부분 파두장이 매우 긴 파형의 개폐과전압이 발생한다. 따라서 상기 식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

(7)

여기서

U^*_{AR}, σ_{AR} : 피뢰기방전전압 및 표준편차

k_{OHL} : 선로말단 피뢰기 지점에서 멀리 떨어진 지점의 전압 상승률

$U'_{50,m}, \sigma'_m$: m개의 갭이 존재하는 상황에서 작업할 경우 50%섬락 전압과 표준편차

(>1000): 파두장($T=1\sim 4ms$)이 긴 파형에 대한 특성 고려

(<500): 파두장($T < 500\mu s$)이 짧은 파형에 대한 특성 고려

2.2 현수형철탑 직접활선작업의 안전성 평가 분석

2.2.1 안전성 평가 산정 조건

앞항에서 서술한 평가방법을 프로그램화하여 다음과 같이 안전성을 평가하였다. 먼저 활선작업의 안전성을 평가하기 위해서는 평가 산정을 위한 조건을 설정하여야 하는데, 표1과 같이 조건을 설정하였다.

표 1 직접활선작업 안전성 평가를 위한 입력데이터
Table 1 Input data Electrical safety level test for Barehand

입력데이터	설정값	설정배경
①공칭전압 (계통최고전압)	765 kV (800 kV)	- 765 kV 절연설계 기준
②개폐과전압 계수	1.9	- 765 kV 절연설계 기준
③개폐과전압 내전압 목표치	1,241 kV	- 765 kV 절연설계 기준
④소요 50% 개폐섬락전압	1,580 kV (표고 1000m기준)	- 765 kV 절연설계 기준
⑤아킹혼 간격(z)	현수 4,800mm 내장 4,600mm	- 청정I지역 기준
⑥활선작업자수	1 명	- 활선작업시 활선에서 작업 하는 작업 인원은 1명임
⑦년간 활선작업 일수	30일/명	- 1명이 활선작업 하는 일 수
⑧하루 중 활선 작업 횟수	2회/일	- 하루에 활선에 접근하여 작업하는 회수를 2회로 가정함
⑨활선작업시간	1시간	- 활선에 접근 후부터 활선작업 실제 시간
⑩해당 선로에서 전체 갭(gap) 수	453 (현수장치+내장장 치x2)	- 765kV 선로중 경간이 가장 큰 신대백-신가평 선로 기준 - 철탑수 현수 181, 내장 136기로 아킹혼만 고려함
⑪50%개폐섬락 전압	실험치 적용	
⑫개폐과전압 년간평균 발생건수	0.5회/년	- 765 kV 송전선로 운영 중 차단기 동작회수 1회/3년임 - 0.33회이나 0.5로 설정함 - 뇌격에 의한 차단기동작 회수는 제외함 (우천시 제외)

표1에서 주요 절연설계 관련은 765kV 절연설계 기준을 참고하였고, 활선작업자 수는 1인으로 하였는데 실제 직접활선작업은 대부분 1인에 의해 수행되기 때문이다. 연간 활선작업일 수는 30일을 기준으로 하였는데, 이는 1인 기준이며 실제 송전선로에서 활선작업이 자주 이루어지지 않기 때문에 30일을 설정한 것은 적정 일수가 아니다. 활선작업시간은 작업자가 등전위를 한 순간부터 고려한 작업시간이며, 실제 이보다 짧을 수도 있고 길수도 있기 때문에 평균적인 개념으로 1시간으로 설정하였다. 해당선로에서 전체 갭(gap) 수는 무수히 많기 때문에

정확한 수량을 정하는 것은 어려움이 있다. 즉, 갭 수라고 하면 아킹혼 간격, 아킹링과 철탑암 및 주주재 간, 점퍼장치와 철탑암 및 철탑주주재 간, 점퍼선과 철탑 간 등 많은 갭을 고려할 수 있기 때문에 이를 수량적으로 산정하는 것이 어려울 수 있다. 따라서 갭 중에서 거리가 가장 짧은 갭을 고려한 것인데, 이것이 아킹혼 간격임으로 아킹혼의 간격만을 산술적으로 산정하였다. 활선작업장에서의 50%개폐섬락전압은 「765kV 송전선로 활선작업시 전기적 섬락특성 연구」에서 실험한 결과를 적용하였다.[1] 개폐과전압의 연간 발생건수는 뇌격에 의한 차단기동작 회수를 제외하고 05회/년으로 정하였다.



2.2.2 안전성 평가 산정 분석 결과

표 1의 입력데이터와 직접활선작업 유형별 50%개폐섬락전압의 실험치를 이용하여 765kV 수직 2회선 6도체 현수형 철탑선로에서의 직접활선작업 유형별 전기적 안전성을 산출하여 보았는데, 직접활선작업의 유형은 정상상태의 섬락전압과 비교하여 다소 낮게 나타났던 경우만을 고려하였다. 이는 직접활선작업시 전기적 안전성은 결국 정상상태와 활선작업을 하는 경우의 섬락전압의 차이가 주된 산정요소임으로, 본 결과에서는 정상 상태와 같은 섬락특성을 갖는 직접활선작업 유형에 대해서는 전기적 안전성 산정이 크게 의미가 없기 때문이다.




이상과 같은 내용에 따라 765kV 수직2회선 6도체 현수형 철탑에서 직접활선작업시 전기적 안전도를 아래의 표2와 같이 산정하였다.

표 2 활선작업 유형별 활선작업자 안전성 계산결과

Table 2 The result of lineman's electrical safety for type of barehand work

작업 Case	활선작업 유형	50%개폐섬락전압 (표준편차)	활 선 작 업 자 안전도(IRD)
1	- 작업사다리를 이용하여 아킹혼을 탈착하는 작업	1,762 kV (σ = 3.4%)	1.5×10^{-11}
2	- 6도체 전선과 수평상으로 활선작업대가 1m 떨어진 위치에 있는 경우	1,811 kV (σ = 2.7%)	2.1×10^{-12}
3	- 활선작업대가 6도체의 중선 위치에서 전선과 접촉 된 상태이고, - 아킹링을 제거한 상태	1,848 kV (σ = 6.0%) 	2.7×10^{-10}
4	- 활선작업대 하부가 6도체의 중선 위치와 같은 위치에서 전선과 접촉된 상태 - 아킹링은 제거한 상태 - 작업자가 6도체중 하부 2도체를 밟고 서서 작업 하는 상태	1,607 kV (σ = 5.4%) 	4.3×10^{-8}

참 고 문 헌

작업 Case	활선작업 유형	50%개폐섬락전압 (표준편차)	활 선 작 업 자 안전도(IRD)
5	- 활선작업대를 철거한 상태 - 아킹링이 제거된 상태 - 작업자가 6도체 중 하부 2도체를 밟고 서서 작업 하는 상황 모의	1,745 kV (σ = 4.9%) 	4.5×10^{-10}
6	- 활선작업대를 철거한 상태 - 아킹링이 설치된 상태 - 작업자가 6도체 중 하부 2도체를 밟고 서서 작업 하는 상황 모의	1,751 kV (σ = 2.3%) 	2.0×10^{-11}
7	- 활선작업대를 철거한 상태 - 아킹링이 설치된 상태 - 작업자가 6도체 중 상부 2도체를 밟고 서서 작업 하는 상황 모의	1,631 kV (σ = 3.0%) 	2.3×10^{-9}

- (주1) 활선작업자 안전도는 활선작업 전당 작업자에게 일어날 섬락확률임
- (주2) 러시아에서는 10^{-6} 범위를 적용기준으로 보고 있음

3. 결 론

상기 분석결과 표2에서 보는 바와 같이 대부분의 안전성이 러시아에서 적용하고 있는 범위인 10^{-6} 을 초과하거나 비슷한 것으로 나타났다. 표2에서 볼 때 765kV 수직 2회선 6도체 송전선로의 현수형 첩탑에서 이루어지는 활선작업은 대부분 안전한 것으로 나타났으며, 아킹링을 제거한 상태에서 작업자가 서 있는 경우에는 2.4×10^{-6} 로 계산이 되었으나, 이 경우에는 실제 활선작업에서 제한하는 작업방법이기 때문에 문제가 되지 않으며, 일반적으로 현수형 첩탑에서의 활선작업은 비교적 공기절연거리에 여유가 있어 안전한 공법을 도출할 수 있다.

이상과 같이 섬락발생 확률개념에서 작업자에 대한 전기적 안전도를 분석하여 제시하였다, 물론 이것은 실선로에서 실제 발생할 상황과 100% 일치한다고 볼 수는 없으나, 국내 765kV 수직 2회선 6도체 현수형 첩탑에서 활선작업자에게 작업하고자 하는 활선작업의 전기적 안전성이 어느 정도인지를 객관적으로 이해시키는데 있어 유용하게 활용될 것이다

감사의 글

본 연구는 2007년도 지식경제부의 전력산업연구 개발 사업(R-2004-0-048)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

- [1] 산업자원부, “765kV 송전선로 활선작업시 전기적 섬락특성 연구”, pp. 161~166, 2006.
- [2] 산업자원부 “초고압 송전선로 활선공법 및 관련장비 개발”, 2차년도 중간보고서, pp. 38~41, 2005.
- [3] D.S. Kim, H.j. Kim, H.K. Lee, S.O. Han, “A Study on Flashover Characteristics of the 765kV Transmission Line During Live Line Works”, APAP2007, P628, April 24-27, 2007
- [4] 한국전력공사, “765kV 송전선로 공기절연거리 실증연구(최종보고서)”, TR.93TJ01.96.15, pp. 71~99, 1996.
- [5] O.V.Bodgdanov, V.P.Dikoj, S.V.Krylov, “Dielectric strength of external insulation and air gaps under live working on EHV and UHV transmission lines”, CIGRE, 1994 Session, Vol 2, No. 303, 28 August - 3 September, 1994
- [6] K.J.Sadurski, C.W.Van Der Merwe, “Live line maintenance of EHV and UHV transmission lines factors influencing the dielectric strength at the work site”, CIGRE, 1994 Session, Vol 2, No. 304, 28 August - 3 September, 1994
- [7] CIGRE, TF 330702, “Strength of external insulation during live line maintenance and repair work with special reference to transient overvoltages”. ELEctra No. 129, 1990

저 자 소 개



김 대 식 (金大湜)

1997년 충남대학교 전기공학교육과 졸업. 2000년 동 대학원 공업교육(전기) 졸업(공학 석사). 2007년 충남대학교 전기공학과 박사과정수료. 현재 한국전기공사협회 기술정책연구원 선임연구원
Tel : 02-3219-0693
Fax : 02-3219-055
E-mail : pinkfrog@keca.or.kr



한 상 옥 (韓相玉)

1974년 충남대학교 공업교육과(전기)졸업. 1986년 인하대학교 전기공학과 졸업(공학). 1985년 독일 하노버대 객원교수. 1989년 일본 나고야대 객원교수. 현재 충남대학교 전기공학과 교수.
Tel : 042-821-5655
Fax : 042-821-8895
E-mail : sohan@cnu.ac.kr