

산불화재에 의한 전력선 섬락사고 기초연구(1)

김충년* · 이상우* · 이광식* · 김인식** · 이동일*** · 박춘식****

* 영남대학교 전자정보공학부 · ** 경일대학교 전기공학과 · ***한국전력연구원 · ****(주)한국전력

Basic Study on Flashover Characteristics of Power Lines by Forest Fire(1)

C. N. Kim* · S. W. Lee* · K. S. Lee* · J. S. Kim** · D. I. Lee*** · C. S. Park****

* Yeungnam Univ. · **Kyungil Univ. · ***KEPRI · ****KEPCO

Abstract - The experiments were performed in model conductors under the application of ac and dc high-voltages. The results of an experimental investigation into the flashover characteristics of air dielectric strength in the presence of oil/gas flame are reported. It is demonstrated that flame can reduce by more than half, 80% in maximum, the breakdown voltage of a model line.

Taking a horizontal model line with a $k=0.5$, it can be seen from the results that the reduction of flashover levels, in comparison with the no-flame case, are 78.7[%] for $h=0$ [cm], 59.6[%] for $h=3$ [cm], 46.4[%] for $h=6$ [cm], 40.4[%] for $h=9$ [cm] and 23.2[%] for $h=12$ [cm] when ac voltage is applied.

1. 서 론

오늘날 현대문명의 발전이나 산업경제의 급진적인 성장에는 전기에너지의 활용에 기인한다고 해도 과언이 아닐 것이다. 산업사회가 발달함에 따라 전기 에너지의 수요는 해마다 증대하고 있으며, 이러한 전기 에너지를 경제적 및 효율적으로 수송하기 위해 선로의 고전압·대용량화는 불가피하게 되었다. 이러한 대용량 송전선의 사고로 인한 전력공급의 중단은 계통의 경제성, 신뢰성 및 안전도의 관점에서 과거보다 더욱 주요한 관심의 대상이 되고 있다. 따라서 전력계통의 운용에 있어서는 무엇보다 정전사고에 대한 대책과 그 예방이 중요하며, 나아가 이들 사고의 원인에 대한 규명은 사고 횟수를 줄이는 데 가장 기본적인 요소가 되고 있다.

송전선로의 정전사고중에서 자연현상에 기인한 사고는 크게 낙뢰와 산불화재로 구분된다. 낙뢰에 의한 피해는 하절기에 많이 발생하고 있으며, 동절기에는 건조한 기후로 인해 산불에 의한 사고가 빈번히 일어나고 있다. 선로의 절연내력에 영향을 미칠 수 있는 고온화염의 형태로서는 거대한 산불화재로부터 송전선로 아래에서 소각되는 쓰레기에 이르기까지 매우 다양하다. 이러한 고온의 화염이 존재하면, 화염 상부에 있는 송전선로는 절연내력이 크게 저하되어 전력선의 선간 또는 전력선과 대지간에 섬락사고를 일으킬 수 있는 조건을 형성할 수 있으므로 계통의 신뢰도 측면에서 매우 중요한 문제가 되고 있다[1]~[4].

화염 자체의 전기적 특성에 대해서는 지금까지 많은 연구가 수행되어 왔으나, 이들 연구의 대부분은 각종 화염에 대한 자체의 임피던스 특성이나, 전위분포에 따른 화염의 저항률 및 전압·전류 특성 등 물리적 현상에 관해 주로 보고하고 있다. 예를 들면, K. Koyama 등은 MHD발전에 적용하기 위해 칼륨 등을 시드(seed)한 상태에서 화염의 도전율을 임피던스 변화법으로 측정하였으며[5], H. Kiwaki 등은 버너를 전극으로 하여 교류 브릿지를 사용하여 화염의 도전율을 측정하였다[6]. 그

러나 고전압 및 방전 공학적 측면에서 화염의 존재에 의한 플래시오버 전압의 저하 즉, 급속 전극과 화염사이의 섬락특성에 대한 연구는 지금까지 거의 발표되지 않고 있어 연구의 필요성을 느낀다.

따라서 본 연구에서는 수평배치 모의선로에 대한 플래시오버특성에 미치는 화염의 영향을 조사하였다. 안정된 소규모 화염중에서 교류 및 직류전압을 인가하였을 때, 도체의 간격, 화염의 위치, 화염의 높이 등을 변화시킨 경우 공기의 플래시오버전압을 조사하였다. 이 때 화염이 없는 경우의 특성과 상호 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 모의선로의 실험장치

그림 1은 수평배치 모의선로에 대한 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

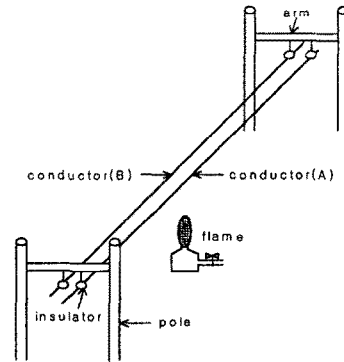


그림 1. 모의선로 실험장치의 개략도

그림 1과 같이 수평배치 도체사이에 연소화염을 배치시켰으며, 고전압 전원은 단상이므로 상부에 설치된 도체는 우측을 고압측, 좌측을 접지측으로 하였다. 모의선로로서 사용된 도체는 직경 2[mm]인 강선(steel wire)을 사용하였다. 화염은 지지물의 중간 지점에 위치하고 있으므로, 모의선로 사이의 플래시오버의 발생 역시 지지물의 중간에서 일어나도록 하기 위해, 그림 1에서 직선으로 표시된 강선 도체의 실제 형상은 에자측 도체의 간격은 크고, 도체 중앙측의 간격은 작도록 완만한 원호(arc)상으로 설치하였다.

화염과 수평배치 모의선로의 배치관계는 그림 2와 같다. 여기서 도체사이의 갭 길이는 d 이며, 접지측 도체와 화염사이 및 도체를 연결한 수평축과 화염의 높이를 각각 l 및 h 로 표시하였다.

수평배치 모의선로의 도체사이 플래시오버 실험에서는 파라핀 오일의 화염을 사용하였다.

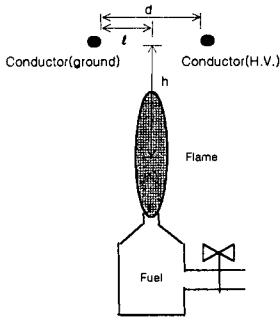


그림 2. 수평배치 모의선로의 배치도

본 연구에서는 교류 및 직류 고전압을 사용하였으며, 교류 고전압은 용량 3(kVA)인 고전압 발생장치(High Voltage Generator, 일본, Matsunaga Mfg. Co. Ltd.)를 사용하였다. 이 장치는 1차 입력전압 220(V), 주파수 60(Hz), 단상이며, 2차 출력전압은 50(kV)이다. 직류 고전압은 상기 고전압 발생장치의 시험용 변압기에서 발생된 교류 고전압을 정류하여 사용하였다(7). 정류 장치는 실리콘정류기(일본, Tokyo Transformer Co. Ltd.)를 이용하였다. 그리고 고전압의 측정은 고전압프로브(High Voltage Probe, 분압비 5000:1)와 디지털 오실로스코프(미국, LeCroy Co., type9350AL)를 사용하였다. 본 실험에서 사용된 절연파괴전압의 측정값은 동일한 조건에서 5회 측정하여 그 평균값을 취하였다.

2.2 연소화염 특성

그림 3은 파라핀 화염의 수직거리에 대한 온도분포특성을 나타낸 것이다. 그림과 같이 소규모인 파라핀 화염의 내부온도는 약 650[°C]정도이며, 화염으로부터 수직거리 h 가 증가함에 따라 공기의 온도는 급격히 낮아지는 것으로 나타났다. 그러나 화염으로부터 약 $h=9\sim 10$ (cm)이상 떨어지면 실내 공기와 온도차가 적어지므로 거리의 증가에 따른 온도의 감소는 완만하게 된다.

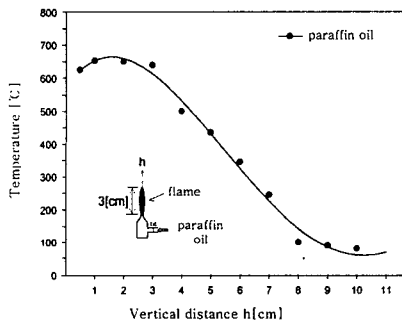


그림 3. 파라핀 화염의 수직거리에 대한 온도분포곡선

연소화염인 파라핀오일(normal paraffin oil, 순도 100[%])오일은 석유계 연료이며, 주성분은 탄화수소이다. 이 연료의 대략적인 조성은 탄소 75-90[%], 수소 8-25[%], 산소 0-3.3[%], 질소 0-2[%], 황 0-5[%] 등으로 되어 있다. 그리고 파라핀오일의 비점은 약 450-570[K], 밀도는 약 0.79-0.83[g/cm³], 발열량은 약 40-50[MJ/kg]이다. 파라핀오일은 액체 연료이며, 단위 중량당 발열량이 크기 때문에 연소장치를 소형으로 할 수 있으며, 연소 후에 회분(ash) 등에 의한 장치의 오손이 비교적 적게 발생하고, 저렴한 가격으로 안정되게 공급할 수 있는 장점이 있다(8).

연소의 형태는 여러가지 방식이 있지만 실내에서 안정된 화염을 발생할 수 있는 심지 연소(wick type combustion)방식을 채택하였다. 이 연소방식은 액체 연료가 모세관 현상에 의해 심지를 통하여 흡인되므로 심지의 노출이 크지 않으면 안정된 자유화염을 용이하게 얻을 수 있다. 램프에서 발생된 화염은 외부 바람에 의해 흔들리지 않도록 1.2×1.2×1.7(m)인 칸막이를 설치하였다. 그리고 화염의 크기는 전압이 인가되지 않는 상태에서 육안으로 관찰하여 폭 0.5(cm), 높이 3(cm)정도로 일정하게 유지하였다.

온도측정에 있어서 100[°C]이하의 낮은 온도는 서미스터온도계로 측정하고, 고온부 온도측정은 약 1,600[°C]까지 측정가능한 열전대 온도계(thermometer, class 0.5, 일본, Shimadzu, Co., 백금-백금 로지움 thermocouple)를 사용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염의 위치에 따른 플래시오버 특성

(1) 교류전압 인가시의 특성

그림 4는 $h=0$ (cm)인 수평배치 모의선로에서 화염 위치에 따른 교류 섬락전압 특성을 나타낸 것이다.

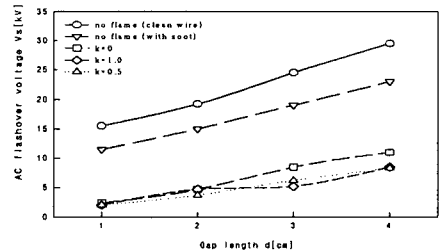


그림 4. 교류 섬락전압 특성

여기서는 화염의 위치에 대한 플래시오버 전압뿐만 아니라, 화염이 없는 경우의 플래시오버 전압과 도체표면에 매연이 부착된 상태에서의 섬락전압도 함께 나타내었다. 파라핀 화염에 대해 섬락전압을 측정할 때, 연소시 발생되는 매연(soot)은 도체가 접근하면 그 표면에 부착하게 된다.

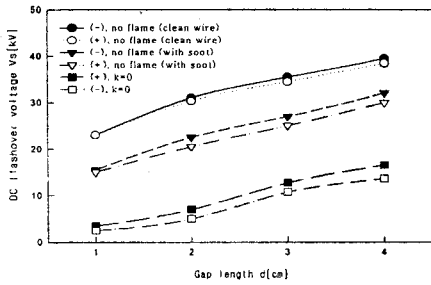
따라서 매연이 부착되기 전후에 있어서 섬락전압을 비교할 수 있다. 갭길이가 비교적 작은 경우 섬락전압은 화염의 위치에 대한 영향은 크지 않았으나, 갭길이가 크게 되면 화염위치에 따른 차이가 나타나며, 이 경우 $k=0$ 에서 가장 높은 것으로 나타났다.

화염이 없는 경우의 섬락전압을 기준 즉, 100[%]로 하였을 때, $k=0.5$ 에 대한 상대섬락 전압의 평균값은 약 21.3[%]였으며, 또한 매연이 부착된 도체의 섬락전압은 깨끗한 상태에 비해 약 77.0[%]인 것으로 나타났다.

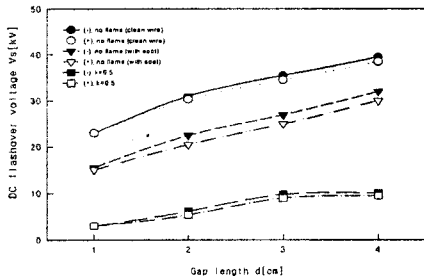
(2) 직류전압 인가시의 특성

그림 5는 $h=0$ (cm)인 수평배치 모의선로에서 화염 위치에 따른 직류 섬락전압 특성을 나타낸 것이다.

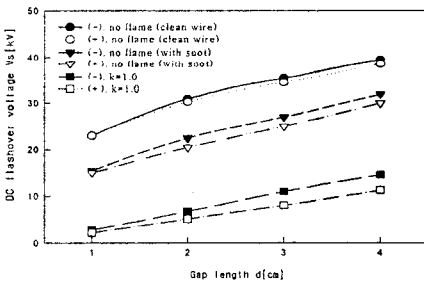
여기서는 화염의 위치에 대한 플래시오버 전압뿐만 아니라, 화염이 없는 경우의 플래시오버 전압과 도체표면에 매연이 부착된 상태에서의 섬락전압도 함께 나타내었다. 그림으로부터 화염에 의한 섬락전압은 $k=0$ 일 때 가장 높고, $k=0.5$ 의 섬락전압이 가장 낮은 것으로 나타났다. 또한 직류전압에서는 극성효과가 나타났으나, 화염의 위치에 따라 상이하하였다.



(a) $k=0$ 인 경우



(b) $k=0.5$ 인 경우



(c) $k=1.0$ 인 경우

그림 5. 직류 섬락전압 특성

$k=0$ 인 경우는 정극성이 부극성보다 높게 나타났으나, $k=1.0$ 인 경우는 오히려 부극성이 정극성보다 높은 것으로 나타나고 있다.

화염이 없는 경우의 섬락전압을 100[%]로 하였을 때, $k=0$ 인 경우 정극성 및 부극성에 대한 상대섬락 전압의 평균값은 각각 29.4[%] 및 22.8[%]이며, $k=0.5$ 인 경우는 각각 20.3[%] 및 21.2[%]였다. 또한 $k=1.0$ 인 경우는 각각 19.0[%] 및 24.7[%]인 것으로 나타났다.

3.2 화염 높이에 따른 플래시오버 특성

(1) 교류전압 인가시의 특성

그림 6은 $k=0.5$ 인 수평배치 모의선로에서 화염 높이에 따른 교류 섬락전압 특성을 나타낸 것이다.

여기서는 화염의 높이 $h=3, 6, 9$ 및 12[cm]에 대한 플래시오버 전압뿐만 아니라, 화염이 없는 경우의 플래시오버 전압과 도체표면에 매연이 부착된 상태에서의 섬락전압도 함께 나타내었다.

파라핀 화염에 대해 섬락전압을 측정할 때, 연소시 발생하는 매연(soot)은 도체가 접근하면 그 표면에 부착하게 된다. 따라서 매연이 부착되기 전후에 있어서 섬락

전압을 비교할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 갭 길이와 화염 높이가 상승할수록 섬락전압은 증가하는 것으로 나타났다.

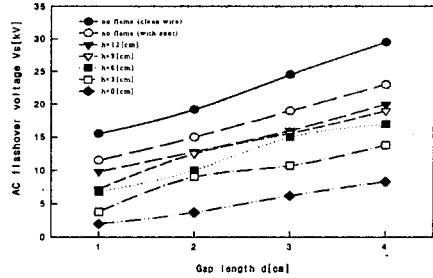


그림 6. 교류 섬락전압 특성

교류섬락전압에 대한 화염 높이의 영향으로서 화염과 매연이 없는 도체의 섬락전압을 100[%]로 하였을 때, $h=0, 3, 6, 9$ 및 12[cm]에 대한 상대섬락 전압의 평균값은 각각 21.3, 40.4, 53.6, 59.6 및 76.8[%]인 것으로 나타났다. 이는 화염이 전극으로부터 멀어지면 상대공기밀도가 증가하기 때문이라고 생각된다.

(2) 직류전압 인가시의 특성

그림 7은 $k=0.5$ 인 수평배치 모의선로에서 화염 높이에 따른 직류 섬락전압 특성을 나타낸 것이다.

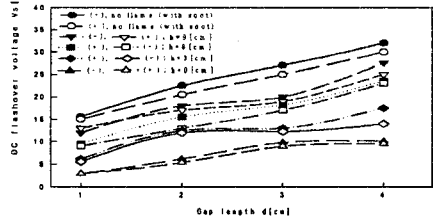


그림 7. 직류 섬락전압 특성

그림으로부터 화염에 의한 섬락전압은 갭 길이와 화염 높이에 비례하여 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 직류전압에서는 극성효과가 나타났으며, 일반적으로 부극성이 정극성보다 높은 것으로 나타났다.

그러나 전극간 공기의 온도가 상대적으로 높은 상태인 $h=3$ 및 6[cm]에 있어서는 정극성이 부극성보다 높은 것으로 나타났다. 화염높이에 따른 영향을 알아보기 위해 여기서는 화염이 없고 매연이 부착된 선로의 섬락전압을 100[%]로 하였을 때, $h=0$ 인 경우 정극성 및 부극성에 대한 상대섬락 전압의 평균값은 각각 28.4[%] 및 28.6[%]이며, $h=3$ 인 경우는 각각 53.1[%] 및 44.6[%]인 것으로 나타났다.

또한 $h=6$ 인 경우 각각 72.5[%] 및 62.6[%]이며, $h=9$ 에서는 각각 83.2[%] 및 79.3[%]인 것으로 나타났다. 그러므로 상대섬락 전압은 $h=0$ 인 경우를 제외하고 부극성이 정극성보다 낮은 것을 알 수 있다.

4. 결 론

모의선로에 화염의 위치와 높이를 변화시키며, 교류와 직류전압 인가시 화염의 영향에 의한 섬락특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 수평배치 모의선로에서 교류전압 인가시, $k=0.5$ 에 대한 상대섬락전압의 평균값은 화염이 없고, 청결한 도체에 비해 약 21.3(%)였으며, 또한 매연이 부착된 도체의 섬락전압은 깨끗한 도체에 비해 약 77.0(%)인 것으로 나타났다.

(2) 직류전압 인가시에는 $k=0$ 에서 정극성 및 부극성의 평균 상대섬락전압은 각각 29.4(%) 및 22.8(%)이며, $k=0.5$ 인 경우는 각각 20.3(%) 및 21.2(%)였다.

또한, $k=1.0$ 인 경우는 각각 19.0(%) 및 24.7(%)인 것으로 나타났다. 따라서 $k=0$ 일 때 정극성이 부극성보다 높으나, $k=1.0$ 인 경우는 부극성이 정극성보다 높은 것을 알 수 있다.

(3) 수평배치 모의선로에서 교류전압 인가시, 화염 높이 $h=0, 3, 6, 9$ 및 12[cm]일 때 상대섬락전압의 평균값은 각각 21.3, 40.4, 53.6, 59.6 및 76.8(%)인 것으로 나타났다.

(4) 직류전압 인가시에는 극성효과가 나타났으며, 일반적으로 정극성이 부극성보다 높은 것으로 나타났다. 화염이 없고 매연이 부착된 선로의 섬락전압을 100(%)로 하였을 때, $h=0$ 인 경우 정극성 및 부극성에 대한 상대섬락 전압의 평균값은 각각 28.4(%) 및 28.6(%)이며, $h=6$ 인 경우 각각 72.5(%) 및 62.6(%)이며, $h=9$ 에서는 각각 83.2(%) 및 79.3(%)인 것으로 나타났다.

(참 고 문 헌)

- [1] Electric Power Research Institute, "Transmission Line Reference Book, 345kV and Above/Second Edition." pp. 381-419, 1989.
- [2] H. J. West, D. W. McMullan, "Fire Induced Flashovers of EHV Transmission Lines," IEEE-PES Winter Meeting, New York, Paper A73047-2, February 1978.
- [3] 김충년, 김인식, 이광식, 이동인 외, "화염에 의한 수직배치전극에서 공기의 절연파괴전압 특성," 2001년도 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, pp.1735-1737, 2001.
- [4] 김영달, 김성덕, 심재명, 정동화, 강지원, "산불에 의한 가공 송전선로의 기계적 열화특성" 한국조명.전기설비학회지 제14권, 제6호, pp.26-34, 2000.
- [5] K. Koyama, T. Sekiguchi, "The Measurement of the Electrical Conductivity of Seeded Flame Plasmas," Trans. on IEE Japan, Vol.87-6, No. 945, pp.1145-1151, 1987.
- [6] H. Kiwaki, S. Komeji, "Electrical Properties of Combustion Flames," Journal of Applied Physics Japan, Vol.41, No. 10, pp.1077-1084, 1972.
- [7] 김인식, 김충년, 이광식, 이동인 외, "모의 송전선로의 섬락특성에 미치는 화염의 영향," 2001년도 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, pp.1738-1740, 2001.
- [8] 김광렬, 노수영, 김영주, "최신 연소공학" 도서출판 동화기술, pp. 63-76, 1999.