

송전철탄 부근의 대지전위 억제를 위한 이격거리 산정모델 연구

최종기, 이동일

한국전력공사 전력연구원 전력계통연구소

A Study on Separation Distance Calculation Model for Limitation of Earth Potential Rise nearby Tower Footings

Jongkee Choi, Dong-il Lee

Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - In case of a line-to-ground fault at transmission lines, a portion of fault current will flow into the earth through the footings of the faulted tower causing electrical potential rise nearby the faulted tower footings. In this situation, any buried pipelines or structures nearby the faulted tower can be exposed to the electrical stress by earth potential rise. Although many research works has been conducted on this phenomena, there has been no clear answer of the required separation distance between tower footings and nearby buried pipeline because of its dependancy on the soil electrical charactersics of the concerned area and the faulted system. In this paper, an analytical formula to calculate the required sepearion distance from the faulted tower has been derived.

1. 서 론

송전선로 지락사고시 고장전류의 일부는 송전철탄의 탐각을 통해 대지로 빠져나가면서 탐각접지 뿐만 아니라 탐각 인근의 토양전위가 상승하게 된다. 만일 통신설비나 가스배관 등이 지락사고가 난 송전철탄 인근에 매설되어 있는 경우에는 이러한 설비가 토양전위 상승으로 인한 스트레스에 노출될 수 있다. 미국이나 캐나다 등 국토가 넓고 장거리 송전선로와 가스배관의 병행하는 경우가 있는 국가들 뿐만 아니라 유럽 선진국에서도 고압 송전선로 인근의 매설배관 또는 통신케이블의 보호와 관련한 연구가 오래전부터 수행되어 왔다[1,2,3].

송전선로 지락시 철탄 인근의 대지전위의 상승값은 지락점의 고장전류, 해당 지역의 대지저항률 등의 조건에 따라 달라지기 때문에 일률적으로 적용할 수 있는 적정 이격거리를 정하는 것은 어려운 문제이다. 1987년에 CIGRE Working Group 36에서 회원국들을 대상으로 조사한 바에 의하면, 철탄-매설배관간 이격거리 규정을 가지고 있는 나라들의 규정치가 2'40 m로 차이가 심하고, 문서 규정이 없이 관련자간 합의에 의해 해결하는 국가가 많다는 것을 이를 반증하고 있다. 상기 조사결과와 주목할만한 사항 중 하나는 매설배관의 전위상승 제한규정을 가지고 있는 나라들의 제한전압은 모두 5000 V 를 사용하고 있다는 것이다. 이는 1966년 프랑스전력공사의 연구보고서의 실증실험을 근거로 합리적인 배관 제한전압으로 추천한 값을 본 논문에서는 대지전위상승의 제한값이 있다는 가정을 토대로 송전철탄에서 지락사고 발생시 대지전위를 한계치 이하로 낮추기 위한 이격거리 산정 모델을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 송전선 지락시 철탄 전위상승 특성

고장전류 해석에 널리 사용되고 있는 대칭좌표법은 삼상회로를 영상, 역상 및 정상회로로 분할하여 해석하는 방법으로서 대지와 중성선을 통합하여 해석하므로 1선지락 사고시 고장전류는 계산할 수 있으나 지락점의 접지전류는 알 수 없게 된다. 따라서 지락점의 접지전류를 계산하기 위해서는 영상회로를 적절히 수정하여 해석하거나[4] 회로방정식을 직접 풀어야만 한다[5,6]. 영상회로를 수정하여 다루는 방법은 계산절차가 너무 복잡하기 때문에 더 이상 사용되지 않으며 대개는 후자의 방법이 이용된다. 그러나 대칭좌표법을 쓰지 않게되면 철탄 가공지선의 다중접지 때문에 루프방정식의 개수가 많아지게 되며 이런 문제를 효율적으로 해결하는 알고리즘 중에 F.P.Dawalibi가 제안한 양단소거법(double sided elimination method)이 있다. 본 논문에서 접지전류 계산에 사용한 SPLTIS (Simulation of Power Lines and Terminal Stations)는 양단소거법에 기초한 범용 회로해석 프로그램이다[7,8].

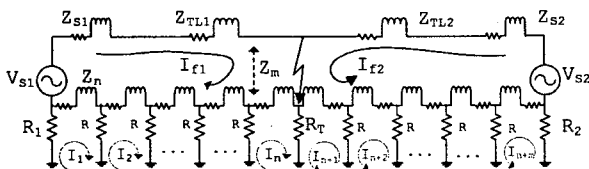


그림 1. 송전선 지락시 접지전류 계산모델

그림 1은 송전선로 지락시 접지전류 해석을 위한 회로모델을 보인 것이

다. 고장전류는 선로 양단에서 공급되며 각 전원단의 전원단임피던스(ZS1, ZS2), 상도체 임피던스(ZTL1, ZTL2), 가공지선 임피던스(Zn), 상도체-가공지선간 상호임피던스(Zm), 각 전원단의 등가 접지저항(R1, R2), 철탄 탐각저항(R) 및 지락지점의 탐각저항(RT)이 변수들이 된다.

그림 2는 345 kV 2회선 선로에서 1선지락시 분류계수(Sf) (=접지전류(Ig) / 고장전류(Iff))와 단위 지락전류(1 kA)에 대한 탐각전위(Sf x Rg) 계산사례이다. 지락고장점을 중심으로 양쪽 전원단은 각각 약 5 [km] 거리에 있고 철탄간 평균경간은 400 [m]를 상정하였다. Case 1은 철탄 접지저항이 모두 동일한 값이라고 상정한 경우이며, Case 2는 가혹한 경우를 상정하기 위하여 지락점(철탄)을 제외한 철탄저항(그림 1의 R)을 20 [Ω]으로 고정하고 지락점의 철탄저항(그림 1의 RT)이 1'20 [Ω]인 경우이다. 양쪽 전원단의 고장전류 분담비율은 5:5 로 가정하였다.

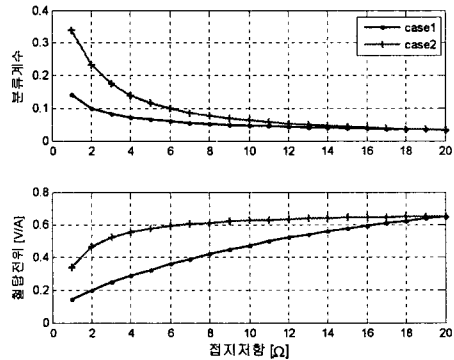


그림 2. 접지 분류계수 및 단위 지락전류에 대한 탐각전위

그림 2에서 보면 지락점의 탐각저항, 즉 대지로 저항이 커질수록 접지전류 또는 분류계수는 감소하며 철탄전위는 증가하며 Case-2가 Case-1에 비해 가혹한 조건임을 알 수 있다. Case 2의 경우 철탄저항이 어느 값 이상이 되면서 철탄전위상승이 포화하고 있음을 알 수 있다.

2.2 탐각접지의 등가반구 모델

반무한매질에 매설된 반구전극 모델은 전극 주변의 전위분포의 계산이 쉬워 접지해석에 자주 이용되고 있다. 임의 형상의 접지극이라 할지라도 일정거리 이상이 되면 반구전극인 경우와 유사한 방사상으로 전류가 분포되므로, 아주 가까운 거리가 아니라면 식 (1)의 전위계산식은 반구형상이 아닌 접지전극 주변의 전위계산에 실용적이기도 하다. 따라서 송전철탄 탐각 접지를 등가의 반구전극으로 표현할 수 있다면 송전선 지락시 탐각으로 유입되는 접지전류로 인한 대지전위값은 수계산으로도 구할 수 있게 된다.

$$V(x) = \int_x^\infty E(x)dx = \int_x^\infty \rho \mathcal{A}(x)dx = \int_x^\infty \frac{\rho I}{2\pi x^2} dx = \frac{\rho I}{2\pi x} \quad (1)$$

(단,  $V(x)$  : 반구전극 중심으로부터 거리  $x$ 인 점의 전위 [V],  $\rho$  : 대지저항률 [ $\Omega m$ ],  $\mathcal{A}(x)$  : 반구전극 중심으로부터 거리  $x$ 인 점의 전류밀도 [ $A/m^2$ ],  $I$  : 접지전류 [A])

그림 3과 같은 역T형 송전철탄 탐각기초 표면적(S)에 등가인 반지름(a)는 식 (2)·식 (3)으로 구할 수 있다.

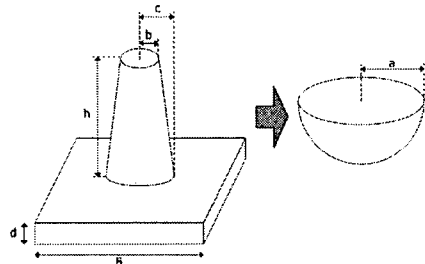


그림 3. 탐각 기의 등가 반구 모델

$$S = \int_0^h 2\pi \left( \frac{b-c}{h} z + c \right) dz + 2B^2 + 4Bd - \pi c^2 \quad (2)$$

$$= 2\pi h \left( \frac{b+c}{2} \right) + 2B^2 + 4Bd - \pi c^2$$

$$S = 2\pi a^2 \leftrightarrow \therefore a = \sqrt{\frac{S}{2\pi}} \quad (3)$$

접지전류(I)가 송전철탐의 네 탐각으로 1/4 씩 분류한다고 가정하면, 탐각 1기의 전위상승값은 식 (4)에 의해 표현되며, 네 탐각이 동일한 전위값을 가지므로 네 탐각의 합성 접지저항은 식 (5)로 기술된다. 4개의 탐각접지를 접지저항에 동가인 단일 반구전극으로 환산한 경우, 등가 반지름(a<sub>eq</sub>)은 식 (6)으로 표현된다.

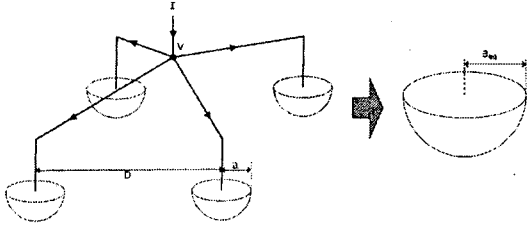


그림 4. 탐각 4기의 등가 반구모델

$$V = \frac{\rho}{2\pi a} \cdot \frac{I}{4} + \frac{\rho}{2\pi D} \cdot \frac{I}{4} + \frac{\rho}{2\pi D} \cdot \frac{I}{4} + \frac{\rho}{2\pi \sqrt{2} D} \cdot \frac{I}{4} \quad (4)$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{8\pi} \left( \frac{1}{a} + \frac{2}{D} + \frac{1}{\sqrt{2} D} \right) = \frac{\rho}{2\pi a_{eq}} \quad (5)$$

$$\therefore a_{eq} = \frac{8aD}{2D+4a+a\sqrt{2}} = \quad (6)$$

이상에 기술한 절차에 의해 환산한 반구전극이 대지전위해석에 적합한지를 검증하기 위하여 유한요소해석-기반의 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 반구전극을 이용한 계산결과를 비교하였다. 그림 5는 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 탐각모델을 보인 것이며 탐각으로부터 수평방향 및 대각선 방향으로 대지전위분포를 계산하였다. 계산조건은 대지저항을 100 Ωm, B=2.2 [m], d=0.6 [m], c=0.6 [m], b=0.168 [m], h=3.3 [m], D=5.464 [m]을 상정하였으며 식 (2)~식 (6)을 이용하여 환산한 탐각 4기의 등가반경은 3.87 [m]이었다. 식 (1)을 이용한 철탐 인근 대지전위와 컴퓨터 시뮬레이션으로 계산한 값은 비교적 잘 일치하였다.

### 2.3 이격거리 산정모델

그림 5는 접지전류 계산을 위한 회로모델과 대지전위를 계산할 수 있는 반구전극을 혼합한 하이브리드 모델의 사례를 보인 것이다. 회로모델의 탐각 접지저항(R)은 탐각에 동가인 반구전극 반지름 및 대지저항과 관계가 있으며 반구전극(탐각)으로부터 거리 x인 곳의 대지전위(V(x))는 회로모델에서 계산되는 접지전류(I<sub>ground</sub>)와 비례 관계이다.

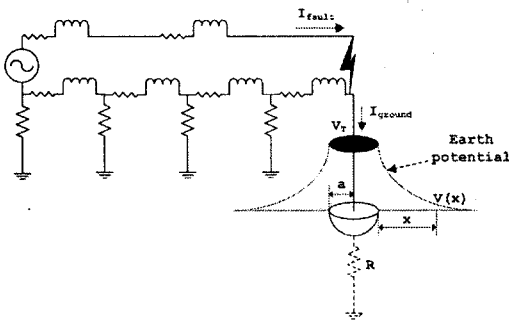


그림 5. 대지전위 계산을 위한 회로-반구전극 합성모델

2.1절에 기술한 회로모델에서 상정한 철탐저항(R) 및 접지전류(I<sub>ground</sub>)와 철탐전위(V<sub>T</sub>) 계산치를 2.2절에 기술한 반구전극의 대지전위 계산식에 대입함으로써 대지전위 임계치(V<sub>crit</sub>) 미만이 되는 거리 x를 계산할 수 있다. 식 (7)은 반구(철탐)으로부터 거리 x인 지점의 전위계산식을 보인 것이며, 식 (8)은 거리 x인 점의 전위가 임계치(V<sub>crit</sub>) 미만이 되기 위한 x의 범위를 나타낸 식이다.

$$V(x) = \frac{\rho I_{ground}}{2\pi(a+x)} = \frac{\rho I_{ground}}{2\pi(a+x)} \times \frac{R}{R} = \frac{a}{a+x} V_T \quad (7)$$

(단,  $V_T = I_{ground} \times R$  (지락점의 철탐전위),  $R = \frac{\rho}{2\pi a}$  (철탐의 탐각저항))

$$V(x) = \frac{a}{a+x} V_T < V_{crit} \leftrightarrow x < \frac{a(V_T - V_{crit})}{V_{crit}} \quad (8)$$

(단, V<sub>crit</sub> : 대지전위상승 제한치)

### 2.4 사례연구

이상에 기술한 이격거리 계산모델을 이용하여 345 kV 2회선 선로(4도체, 가공지선 2조)에서 고장전류 크기 및 탐각저항에 따른 이격거리 산정 사례를 그림 6에 보였다. 대지전위 제한치는 5000 [V]를 가정하였고<sup>[9]</sup> 탐각의 등가 반지름은 345 kV 철탐기초의 평균값인 6.3 [m]를 적용하였으며 지락 고장전류의 범위는 5 ~ 50 [kA]를 고려하였다. 또한 가혹한 고장조건을 상정하기 위하여 가공지선으로부터 가장 먼 상도체의 지락고장을 상정하였다. 이 경우 상도체-가공지선간 상호결합이 약하므로 가공지선을 통한 쿨로전류는 작아지고 상대적으로 접지전류는 커지게 된다.

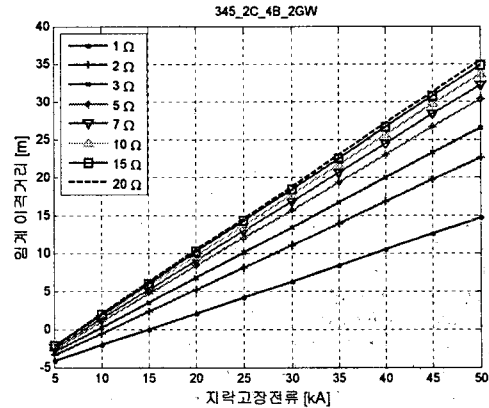


그림 6. 고장전류 크기 및 탐각저항별 이격거리 계산사례

그림 6는 가혹한 조건을 위하여 지락점을 제외한 탐각저항을 345 kV 철탐저항의 제한치인 20 [Ω]으로 고정된 경우이다. 이격거리가 0이하로 떨어지는 경우는 철탐의 전위(V<sub>T</sub>)가 임계값(5 kV)가 작음을 의미하므로 이격거리가 무의미해진다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 송전철탐에서 지락사고가 발생한 경우 송전철탐 인근의 토양전위를 한계치 이하로 유지하기 위한 이격거리 계산식을 만들기 위하여, 접지전류 계산을 위한 회로모델과 대지전위 계산을 위한 반구전극 모델을 동시에 고려한 회로-반구전극의 하이브리드 모델을 제안하였다. 제안한 이격거리 산정모델을 이용하여 345 kV 송전선에서 지락전류 및 송전철탐의 탐각저항과 송전철탐 인근의 토양전위를 제한치 미만으로 유지하기 위한 이격거리의 상관관계 계산사례를 제시하였다. 그러나 지락사고로 인한 대지전위분포는 검토 지역의 토양조건과 매설구조물의 유무 여부(또는 배치), 고장조건 및 고장계통의 특성 등에 의해 크게 달라질 수 있기 때문에, 본 논문의 이격거리 산정모델은 송전선로 지락시 송전철탐 인근에서 대지를 통한 전위간섭 영향 평가 초기 검토단계에서 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] B.Favez, J.C.Gougeuil, Contribution to studies on problem resulting from the proximity of overhead lines with underground metal pipelines, CI GRE-336, 1966
- [2] J.Pohl, Influence of high-voltage overhead lines on covered pipelines, CIGRE-326, 1966
- [3] B.C.Hydro, Study of problems associated with pipelines occupying joint-use corridors with AC transmission lines, Vol.1, CEA No.75-02, 1979
- [4] S.Sebo, "Zero sequence current distribution along transmission lines", IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-88, No.6, Jun. 1969, pp.910-919
- [5] L.M.Popovic, "Practical method for evaluating ground fault current distribution in station supplied by an unhomogeneous line", IEEE Trans. on PD, Vol.12, Apr. 1997, pp.722-727
- [6] A.P.Sakis Meliopoulos, "Power System Grounding and Transient", pp. 278-291, Marcel Dekker Inc, 1988,
- [7] F.P.Dawalibi, "Ground Fault Current Distribution Between Soil and Neutral Conductors", IEEE Trans., PAS-99, No.2, Mar/Apr, 1980
- [8] SES, SPLITS Users' manual, 1995
- [9] CIGRE Study Committee 36, "Results of an International Survey of the Rules Limiting Interference Coupled into Metallic Pipelines by High Voltage Power Systems", 1987
- [10] 산업자원부, 전력선 접지점과 매설배관의 이격거리 표준화(중간보고서), 2006