

운전 중인 송전철탐의 전위강하시험에 의한 접지성능 진단

신복현, 유철환, 김재열, 강연욱, 최종기
한국전력공사

Measurement of Energized Tower Footing Resistance by Fall-Of-Potential Test

Bok-hyun Shin, Cheol-hwan Ryu, Jae-yeol Kim, Yeon-wook Kang, Jong-kee Choi
Korea Electric Power Corp.

Abstract - 송전철탐의 접지저항은 송전선로의 내뢰성능 평가에 중요한 파라메타 중 하나이다. 송전선로가 일단 가압된 이후에는 가공지선에 의해 모든 철탐이 병렬 연결되어 철탐 단독의 접지저항 측정은 현실적으로 어려운 문제가 있다. 본 논문에서는 리비아 전력청의 협조 하에 가공지선 분리 전후의 220 KV 송전철탐의 접지저항 측정을 위하여 수행한 전위강하시험과 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 분석결과를 제시함으로써 컴퓨터 모델을 이용한 철탐 접지저항 추정방법의 신뢰성을 검증하고자 한다.

탑 인근의 대지전위의 상승정도가 분류계수에 비례하므로 철탐의 가공지선 분리 전후의 전위강하시험 결과를 비교한다면 이 철탐의 분류계수를 역산할 수 있게 된다. 본 절은 리비아 전력청(GECOL, General Electricity Company of Libya)의 협조를 받아 송전 중인 220 kV 송전계통 철탐을 대상으로 가공지선 연결 전후의 전위강하시험 결과와 각 철탐에서 분류계수 역산결과를 제시한다.

1. 서론

송전선 지락시 고장전류는 가공지선과 대지를 통해 전원으로 귀환하며 송전철탐 탑각을 통해 귀환하는 접지전류는 철탐 및 인근 토양의 전위상승을 초래한다. 고장전류 분류계수(fault current division factor)는 지락점에서 고장전류에 대한 접지전류의 비(比)로 정의되며, 이러한 분류계수는 변전소처럼 다중접지된 전력설비의 접지설계시나 접지극 또는 토양 전위상승 예측을 위한 중요한 파라메타이다. 과거 여러 연구자들이 모의고장시험(staged fault test)을 통해 분류계수를 실측한 사례가 있었으나 [1-3], 이같은 시험은 선로후전, 안전의 고려 등 측정준비 및 작업에 많은 노력을 필요로 한다. 본 논문에서는 가압되어 있는 220 kV 송전철탐을 대상으로 가공지선 연결 전후에 각각 수행한 전위강하시험 결과와 이로부터 송전철탐의 분류계수를 역산한 사례를 제시하였다.

2. 본론

2.1 운전 중인 선로에서 철탐 전위강하시험

그림 1은 접지저항 측정에 널리 이용되는 전위강하시험회로의 예와 전형적인 결보기저항(apparent resistance), 측정곡선을 보여주고 있다[4]. 여기서 결보기저항은 측정대상접지극(P₁)과 전위극(P₂)사이의 전위차를 주입전류로 나눈 수치를 의미한다(그림 1 참조). 그림 1(a)에서 P₂전극을 이동하면서 측정대상전극(P₁)과의 전위차를 측정하여 이를 주입전류로 나눈 결보기저항을 위치별로 기록하면 그림 1(b)와 같은 저항곡선을 얻게된다. 이상적으로는 접지극 전위측정을 위한 기준전극이 무한원점, 즉 영전위점에 위치하여야 하지만 전위강하시험에서는 그림 1(a)의 두 접지극 사이에 생기는 인위적인 영전위구간, 즉 그림 1(b)의 평평한 구간 또는 철탐으로부터의 거리가 총 측정선 길이의 61.8%인 지점에 기준전극(P₂)을 위치시켜 접지저항을 측정하게 된다[5].

준공 이후 송전선로의 가공지선은 다른 송전철탐들의 탑각을 통해 다중접지되므로 그림 3에서 보인 것처럼 단일 철탐에 대한 전위강하시험시 주입전류의 일부는 가공지선을 통해 외부로 빠져나가게 된다. 그림 3의 철탐 분류계수(S_f)를 전위강하시험의 주입전류(I)에 대한 탑각저항(R_g)으로 흐르는 전류의 비로서 정의하면, 철탐과 철

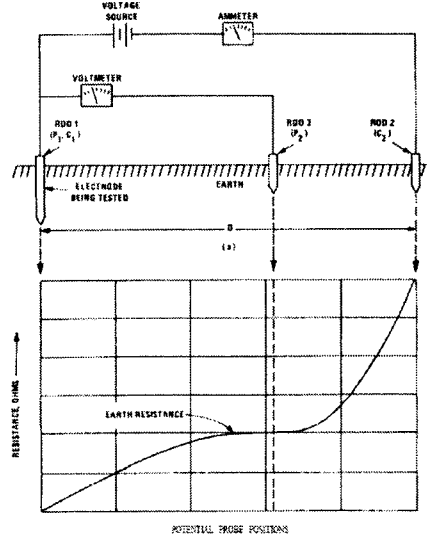
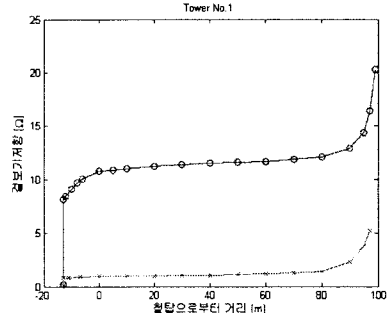


그림 1. 접지저항 측정을 위한 전위강하시험

그림 2는 총 4기의 철탐을 대상으로 가공지선 분리 전후의 전위강하법 시험결과를 보인 것이다. 그림 2로부터 가공지선 분리 후 탑각 단독의 접지저항값은 No.1 철탐은 11-12 Ω, No.2 철탐은 4-5 Ω, 그리고 No.3 및 No.4 철탐은 약 7 Ω 정도로 추정되었다.



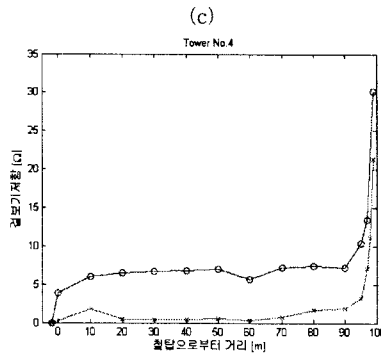
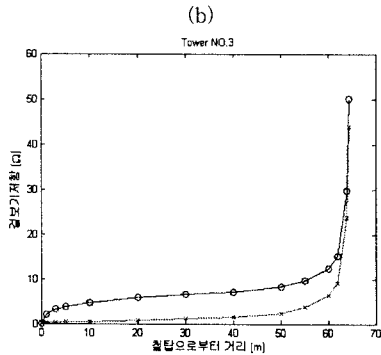
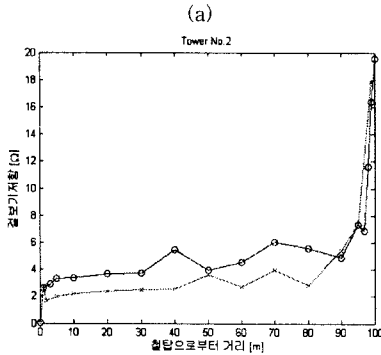


그림 2. 가공지선 분리 전후의 전위강하곡선 측정치
(o:가공지선 분리 후, x:분리 전)

2.2 운전 중인 선로에서 분류계수 산정

가공지선 연결시 탐각전위 및 인근 토양전위는 가공지선 분리 한 후의 전위에 비하여 감소하게 되는데, 임시전극(그림 1에서 C₂전극)에 의한 전위간섭효과를 무시하면 가공지선 연결시 전위의 저감율은 분류계수(S_f)와 같은 값이 된다(그림 3 참조). 그림 4는 네 번째 철타(Tower No.4)에서 가공지선 연결시의 절보기저항 측정값(R_{tower+gw})와 분리 후의 탐각 단독일때의 측정값(R_{tower})의 비율을 계산한 결과를 보인 것이며, 그림에서 10m의 값을 bad data로 간주하고 임시전극의 전위간섭 영향을 무시할 수 있는 탐각 인근의 계산값인 0.07을 분류계수(S_f)로 산정할 수 있다. 같은 방법으로 그림 2의 측정곡선으로부터 No.1-3 철타의 분류계수(S_f)는 각각 0.1, 0.6, 0.1로 산정되었다.

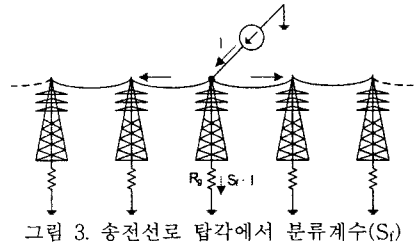


그림 3. 송전선로 탐각에서 분류계수(S_f)

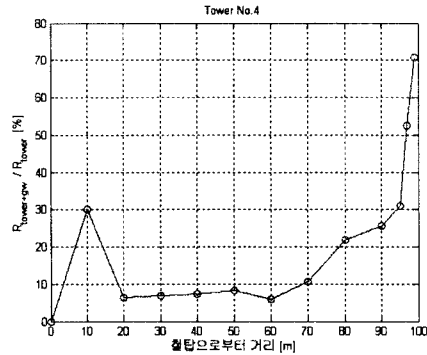
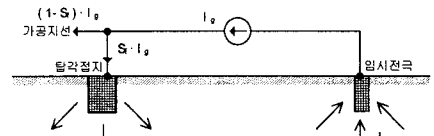


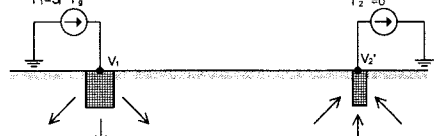
그림 4. 가공지선 연결 전후의 전위강하곡선의 비(比)

2.3 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 측정치 해석

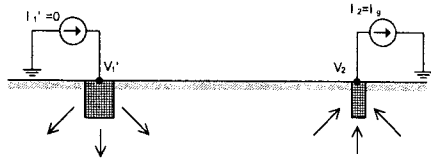
접지해석을 위한 알고리즘은 접지극을 다수의 세그먼트들로 분할하고 이들 간의 전압전류 방정식의 해를 구하는 일반적이다 [6,7]. 이 알고리즘을 확장하면 분류계수가 1이 아닌 경우의 전위강하시험 시뮬레이션도 가능해진다. 그림 5는 시뮬레이션을 위한 컴퓨터 모델을 보인 것이다. 그림 5(a)는 가공지선이 연결된 상태에서 송전철타에 대한 전위강하시험의 전류주입회로를 간략하게 보인 것이다. 가공지선은 다른 철타들의 탐각접지를 통해 다중접지되어 있으므로, 시험대상 철타에 주입한 전류(I_g) 중 일부만이 탐각접지를 통해 대지로 누설된다. 여기서 분류계수(S_f)는 총 주입전류(I_g) 중 탐각을 통해 누설되는 전류의 비(比)이다. 그림 5(a)의 모델에서 중첩의 원리를 적용하면 접지전극을 통해 대지로 누설되는 전류들을 두 개의 별도 전류원으로 고려할 수 있다. 즉, 그림 5(b)는 시험 중인 탐각을 통해 누설되는 전류를 하나의 전류원(I₁=S_fI_g)으로 표현하고 임시전극으로 출입하는 전류는 계거(I₂'=0)한 모델을 보인 것이며, 반대로 탐각 누설전류를 제거(I₁'=0)하고 임시전극의 누설전류(I₂=I_g)만을 고려한 경우의 모델이 그림 5(c)이다. 편의상 전류가 주입되는 전극을 충전전극이라고 지칭하기로 한다.



(a) 송전 중인 철타에서 전위강하시험의 전류주입회로



(b) 전극간 지표면전위 해석을 위한 등가모델-1



(c) 전극간 지표면전위 해석을 위한 등가모델-2
그림 5. 전위강하시험 재현을 위한 컴퓨터 모델

충전전극과 비충전전극을 각각 m 개와 n 개의 도체 세그먼트들로 분할하고, 각 도체 세그먼트 그룹의 전압 및 누설전류 벡터를 각각 V_1, I_1, V_2', I_2' 로 표시한다. 여기서 대시(')표시는 충전되지 않은 전극을 의미하며, 이 전극의 세그먼트들의 누설전류 대수합은 0이다. 각 세그먼트 그룹들의 전압전류 방정식은 식 (1)과 같이 두 그룹의 방정식으로 기술되는데, 상단 방정식을 I_1 에 대하여 정리하여 하단 방정식에 대입하면 식 (2)를 얻을 수 있다. 전극 자체의 도체임피던스에 의한 전압강하를 무시하면 충전전극 도체 세그먼트들의 전위는 모두 v_1 이고 비충전전극 도체 세그먼트들의 전위는 모두 v_2' 이므로(식 3) 식 (2)를 I_2' 에 대하여 정리하고(식 4) 비충전전극의 누설전류 제약조건(식 5)을 적용하면 식 (6)과 같이 v_1 과 v_2' 의 비례상수 α 를 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2' \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$V_1 = Z_{11}Z_{21}^{-1}(V_2' - Z_{22}I_2') + Z_{12}I_2' \quad (2)$$

$$V_1 = v_1 \times 1, V_2' = v_2' \times 1 \quad (3)$$

$$I_2' = (Z_{12} - Z_{11}Z_{21}^{-1}Z_{22})^{-1}(Z_{11}Z_{21}^{-1})V_2' \quad (4)$$

$$= XV_1 - YV_2' = (X \cdot 1)v_1 - (Y \cdot 1)v_2'$$

(단, $X = (Z_{22} - Z_{11}Z_{21}^{-1}Z_{22})^{-1}$, $Y = (Z_{12} - Z_{11}Z_{21}^{-1}Z_{22})^{-1}(Z_{11}Z_{21}^{-1})$)

$$\sum_{k=1}^n i_{2k}' = 0 = v_1 \sum_{k=1}^m x_k - v_2' \sum_{k=1}^n y_k \quad (5)$$

$$\therefore v_1 = \alpha v_2' \quad (\text{단, } \alpha = (\sum_{k=1}^n y_k) / (\sum_{k=1}^m x_k)) \quad (6)$$

이번에는 식 2의 하단 방정식을 I_2' 에 대해 정리하여 이를 상단 방정식에 대입하고(식 7), 이를 I_1 에 대하여 정리한다(식 8). 충전전극 세그먼트들의 전류합, 즉 총 주입전류(= $S_f I_g$)는 이미 알고있는 값이므로 식 10에 의해 비충전전극의 전압(v_2')을 구할 수 있으며, 이를 식 6에 대입하면 충전전극의 전압(v_1)도 계산된다. 따라서 식 1의 좌변항(V_1, V_2')이 모두 구해지므로 전극 세그먼트들의 누설전류 벡터(I_1, I_2')는 유일한 해로써 계산된다.

$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}Z_{22}^{-1}(V_2' - Z_{21}I_1) \quad (7)$$

$$= (Z_{11} - Z_{12}Z_{22}^{-1}Z_{21})I_1 + Z_{12}Z_{22}^{-1}V_2'$$

$$I_1 = (Z_{11} - Z_{12}Z_{22}^{-1}Z_{21})^{-1}V_1 - (Z_{11} - Z_{12}Z_{22}^{-1}Z_{21})^{-1}Z_{12}Z_{22}^{-1}V_2' \quad (8)$$

$$= AV_1 + BV_2' = (A \cdot 1)v_1 + (B \cdot 1)v_2'$$

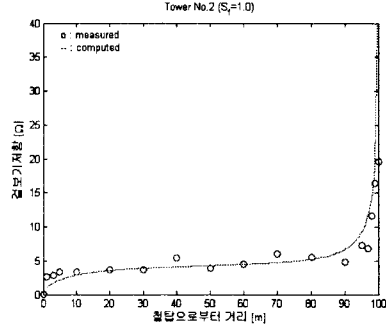
(단, $A = (Z_{11} - Z_{12}Z_{22}^{-1}Z_{21})^{-1}$, $B = -(Z_{11} - Z_{12}Z_{22}^{-1}Z_{21})^{-1}Z_{12}Z_{22}^{-1}$)

$$\sum_{k=1}^m i_{1k} = S_f I_g = v_1 \sum_{k=1}^m a_k + v_2' \sum_{k=1}^n b_k \quad (9)$$

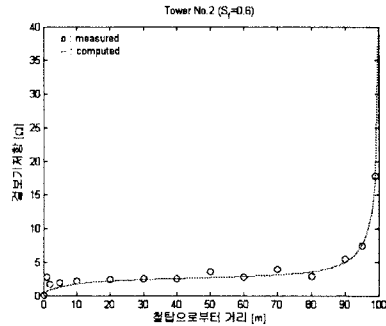
$$\therefore v_2' = \frac{S_f I_g}{\alpha \sum_{k=1}^m a_k + \sum_{k=1}^n b_k} \quad (10)$$

그림 6(c)의 모델에서도 유사한 절차를 통해 해가 구해지고, 최종적인 접지극 전압, 전류벡터는 이 두 해를 합한 값이 된다. 임의의 한 점에서 전위는 각 도체 세그먼트들의 누설전류에 의한 전위상승값의 합이므로 측정대상 접지극의 전위($v_1 + v_2'$)를 구할 수 있으며, 모든 도체

세그먼트들의 누설전류를 구하였으므로 임의의 점에서 전위도 계산할 수 있다. 접지극과 지표면의 전위차를 주입전류(I_g)로 나눈 값이 그 지점의 걸보기저항이 되므로, 분류계수가 1이 아닌 경우의 송전철탑 전위강하시험을 시뮬레이션할 수 있다. 본 논문에서는 상용 프로그램인 MALT[6,9,10]를 이용하여 컴퓨터 모델링 및 시뮬레이션을 수행하였다.

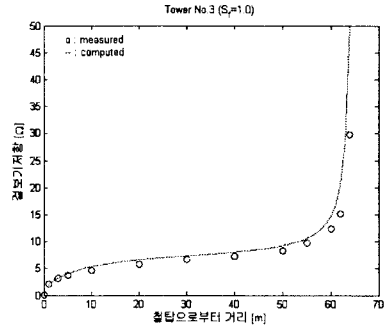


(a) 가공지선 분리

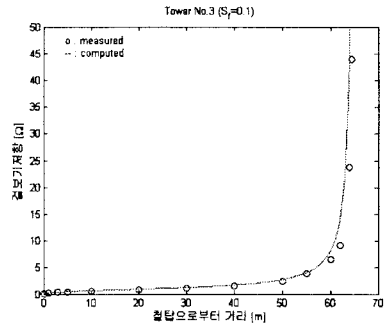


(b) 가공지선 연결

그림 6. 전위강하법 측정/계산곡선 비교 (Tower No.2)

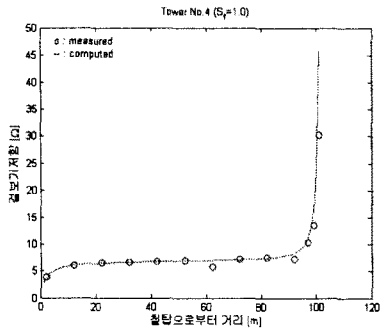


(a) 가공지선 분리

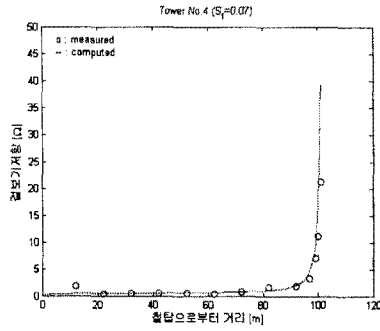


(b) 가공지선 연결

그림 7. 전위강하법 측정/계산곡선 비교 (Tower No.3)



(a) 가공지선 분리



(b) 가공지선 연결

그림 8. 전위강하법 측정/계산곡선 비교 (Tower No.4)

그림 6-8은 Tower No. 2-4에서 가공지선을 분리한 전후의 전위강하시험 측정값과 계산값을 각각 비교한 결과이며, 가공지선 분리 후 철탁 단독일 때와 가공지선 연결한 상태에서 모두 계산치가 측정치와 잘 일치함을 확인할 수 있다. 그러나 Tower No. 1은 주변에 넓은 공터가 있었던 다른 철탁과는 달리 민가 지역 도로변에 위치한 관계로 부득이하게 도로 옆 발을 따라 대지저항을 측정하였으나, 측정치에 근거하여 식별한 토양모델을 사용한 전위강하곡선이 실측치와 3배 이상의 큰 차이가 있었다. 이러한 모델링 오류는 발 주변의 저항율이 철탁 인근 토양과 저항율과 차이가 큰 때문인 것으로 추정되며, 컴퓨터 모델에서 토양모델링이 중요한 요인임을 보여주는 사례이다. 측정 일정상 대지저항율의 재측정이 곤란하였으므로 본 논문의 전위강하법 시뮬레이션 사례에서 제외하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 송전 중인 220kV 선로의 송전철탁에서 가공지선 연결 전후의 전위강하시험을 수행하고, 가공지선 연결/분리시 측정값을 비교함으로써 각각의 철탁에서 분류계수를 역산하였다. 전위강하시험을 시뮬레이션하기 위한 컴퓨터 모델들을 구성하여 가공지선 분리 후 철탁 단독일 때의 전위강하시험을 재현한 결과, 측정 및 계산 곡선이 서로 잘 일치함을 확인함으로써 컴퓨터 모델의 신뢰성을 확인하였다. 동일 모델을 이용하여 이번에는 각 철탁에서 역산한 분류계수 적용시의 전위강하시험 시뮬레이션 결과와 가공지선 연결시의 측정곡선을 비교한 결과, 역시 서로 잘 일치함을 확인하였다. 이로써 주의깊은 대지저항을 측정/해석 및 접지극 모델링에 기반한 컴퓨터 시뮬레이션 방법이 신뢰성이 있음을 실증하였으며, 이러한 모델링 기법은 향후 송전선 지락시 철탁인근 시설물의 전위강하해석이나 직접 측정이 곤란한 준공 이후 개별 송전철탁의 접지저항 측정 등에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] J.Fortin, H.G.Sarmiento, D.Mukhedkar, "Field Measurement of Ground Fault Current Distribution and Substation Ground Impedance", IEEE Trans. on PD, Vol. PWRD-1, No.3, July 1986
- [2] J.Fortin, H.Sarmiento, D.Mukhedkar, "Field measurement of ground fault current distribution and substation ground impedance at LG-2, Quebec," in IEEE Trans. On PD, vol. PWRD-1, no.3, July 1986
- [3] P.R.Pillai,E.P.Dick,"A Review on Testing and Evaluating Substation Grounding Systems", IEEE Trans. on PD, Vol.7, No.1, Jan. 1992
- [4] Grounding, Bonding and Shielding for Electronic Equipments and Facilities, MIL-HDBK-419A, 1987
- [5] Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems, ANSI/IEEE Std 81.9-1991, pp. 38
- [6] F.P.Dawalibi, D.Mukhedkar, "Optimum design of substation grounding in two-layer earth structure: Part I.Analytical study, Part II.Comparison between theoretical and experimental results, and Part III. Study of grounding grids performance and new electrodes configuration," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, no. 2, pp. 252.261, 262.266, 267.272, Mar./Apr. 1975.
- [7] Hepe, R. J., "Computation of potential at surface above an energized grid or other electrode, allowing for nonuniform current distribution," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no. 6, pp. 1978.1989, Nov./Dec. 1979.
- [8] RESAP Users' Manual, SES, 2000
- [9] MALT Users' Manual, SES, 2000
- [10] F. P. Dawalibi, F. Donoso, "Integrated Analysis Software for Grounding, EMF, and EMI", IEEE Computer Applications in Power, Vol.6, No.2, April 1993, pp. 19-24.