

초고압 송전선로의 자계크기 실측과 해석

· 조성배 이은웅 이민명
한전 전력연구원 충남대 대전산업대

Measurement and Analysis of the Magnetic Fields Magnitude under High Voltage Transmission Lines

Sung-Bae Cho Eun-Woong Lee Min-Myung Lee
KEPRI Chung-Nam Univ. Daejon Univ. of Technology

Abstract - EMF measurements for the selected lines by a kinds of tower configurations, conductors among 154kV, 345kV transmission lines which are a standard forms of high voltage transmission line in Domestic are performed at the field. Based on these measurings, Co-relation of both the power current and the magnetic field strength is studied, compared of measured and calculated magnetic magnitude, and Using the measured equation obtained from field measuring, Magnetic field exposure value occurring under T/L for one year(1997) is presented.

1. 서 론

최근 전력사용량이 증가하면서 송전설비가 초고압화되고 주거지에 근접하면서 전력설비에 의해 발생하는 자계가 인체나 생활주변에 나쁜 영향을 미치지 않는가 하는 인식이 확산되고 있으며 각국에서는 가전기기 뿐만 아니라 전력설비에서 발생하는 전자계연구^{[1][2]}와 현장 실측을 점차 강화하고 있는 추세이다. 그러나 대부분 국가에서는 전계 규제치 또는 권고안을 제정, 운용하고 있으나 자계에 관해서는 명확한 규명이 없이 몇몇 나라에서 자체적으로 기준치를 정하여 운용하고 있으며 현장 실측연구도 주로 배전선로를 주 대상으로 하고 있기 때문에 실제로 민원의 대상이 되는 송전선로의 자계연구는 전력사업 측면에서 매우 시급한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 상용주파수 전원인 60Hz 송전선로에서 부하전류가 흐르고 있는 선로 직하에서 발생하는 자계량을 선로설치 조건을 감안한 전류와 자계의 관계로 이들에 의해 계산한 값과 장시간, 단시간으로 구분하여 현장에서 실측한 값을 비교, 분석함으로써 송전선로에서 발생하는 자계량을 객관성 있게 도출하는데 목적이 있는데 연구 내용으로는 국내 대표되는 철탁형상과 수직배열 2회선인 154kV 단도체 외 5개 형상을 대상으로 부하변동이 거의 없는 주 간선선로 및 부하변동이 심한 수용가 선로하에서 측정된 전류 및 자계와 측정선로에서 이론적으로 도출되는 전류-자계의 상관관계식으로 계산한 자계를 비교, 분석하였다. 그리고 그 선로의 '97년 1년동안의 일일 최대, 최소 자계량을 도시하여 송전선로하에서 노출되고 있는 자계량의 평균치 크기를 구하였다.

2. 송전선로하에 분포되는 자계측정 이론

2.1 자계노출량

자계의 강도와 그 강도에 노출된 시간의 적산치로 구할 수 있으며 일정 시간간격으로 계속된 자계강도를 반도체메모리에 축적, 데이터 처리한다. 이때 계속 시간간격을 최소 1초에서 10초 또는 1분 단위로 해도 무방하다.^[3] 여기서 이산적으로 얻어진 수치의 합은 식(1)로 나타내며 연속적으로 얻어진 수치의 합은 식(2)와 같다.

$$B_{ex} = \sum B_i \quad \text{-----(1)}$$

$$B_{ex} = \int B_i dt \quad \text{-----(2)}$$

여기서 첨자 i 는 i 번째 측정시각이다.

2.2 자계발생 이론

그림 1은 지표면위 높이 Y , 전류 I 가 흐르는 무한도체에서 거리 R 만큼 떨어진 지점 $p(X_p, Y_p)$ 에 나타나는 자속밀도는 식(3)과 같다.

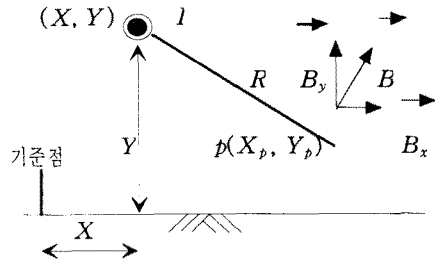


그림 1. 전류 I 가 흐르는 무한도체가 발생하는 자계
Fig 1. Magnetic Field of Infinite Conductor by Power Current I

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad \text{-----(3)}$$

여기서 $R = \sqrt{(X_p - X)^2 + (Y_p - Y)^2}$ 로 구해지며 μ_0 는 공기중의 투자율이다. 실제 송전선로와 같이 선로의 수가 여러개인 경우에는 각각의 선로로부터 발생하는 자계를 분리하여 계산한 후 각각의 합성치를 구하면 된다. 즉, $N_1, N_2, N_3 \dots N_n$ 등 n 개의 도체에 흐르는 전류를 $I_1, I_2, I_3 \dots I_n$, 도체 각각의 좌표를 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2) \dots (X_n, Y_n)$, 계산 위치를 $p(X_p, Y_p)$ 라고 하면 p 점에서의 자속밀도 성분 B_x, B_y 는 식(4), 식(5)로 구해진다.

$$B_x = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \frac{Y_i - Y_p}{(X_p - X_i)^2 + (Y_p - Y_i)^2} \quad \text{-----(4)}$$

$$B_y = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \frac{X_p - X_i}{(X_p - X_i)^2 + (Y_p - Y_i)^2} \quad \text{-----(5)}$$

그리고 이것의 합성자속밀도는 식(6)과 같다.

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad \text{-----(6)}$$

여기에서 전류가 흐르지 않는 가공지선은 계산을 할 필요가 없다. 실제로 영상전류가 흐를 것이지만 그 크기는 매우 작기 때문에 무시하여도 된다. 실제의 송전선로인 경우 대부분 수직배열 2회선 형태이므로 철탁을 중심으로 $\pm X[m]$ 와 지표면에서 각 도체까지의 높이 $Y[m]$

로 나타내지며 각 상 a, b, c, a', b', c' 선로의 전류는 식 (7), (8)과 같으며 계산하지 않는 가공지선은 $GW1, GW2$ 로 표기한다.

$$I_1 = I_a = I_0 \sin(\omega t) \quad \text{-----}(7)$$

$$I_6 = I_c = I_0 \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \quad \text{-----}(8)$$

2.3 국내 송전선로 자계계산 좌표치

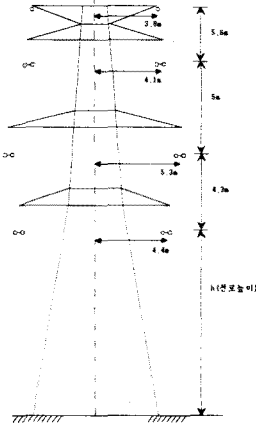


그림 2. 송전선로 철탑 형상도

Fig 2. Tower Configuration of Transmission Line

그림 2는 국내 송전선로에 적용되는 수직배열2회선의 철탑형상도이다. 철탑 좌표 (X, Y)의 기준점은 중압직하인 (0,0)이며 표 1은 국내 송전선로의 자계계산을 위한 좌표치로써 특수 철탑을 제외하고 일반적으로 적용될 수 있는 좌표를 도시하였다.⁽⁴⁾

표 1. 국내 송전선 자계계산용 좌표치

Table 1. Coordinates Value for EMF Calculation in Domestic's T/L

좌표 철탑형태	X	Y
154kV상각1회선 -단도체,GW1	(-4.8, 3.6, 4.8, 0)	(H, H+4.3, H, H+10.7)
" 수평1회선 -단도체,GW1,2	(-2.4, 0, 2.4, -2.7, 2.7)	(H, H, H, H+3.1, H+3.1)
" 수직2회선 -단도체,GW1	(-3.8, -4.7, -3.5, 3.5, 4.7, 3.8, 0)	(H, H+3.8, H+8.3, H+8.3, H+3.8, H, H+14.4)
" 수직2회선 -단도체,GW1,2	(-4.2, -5.1, -3.9, 3.9, 5.1, 4.2, -3.65, 3.65)	(H, H+4.3, H+9.3, H+9.3, H+4.3, H, H+14.4, H+14.4)
" 수직2회선 -2B,GW1,2	(-4.4, -5.3, -4.1, 4.1, 5.3, 4.4, -3.8, 3.8)	(H, H+4.3, H+9.3, H+9.3, H+4.3, H, H+14.9, H+14.9)
345kV수직2회선 -2B,GW1,2	(-8.1, -9.0, -7.5, 7.5, 9.0, 8.1, -5.0, 5.0)	(H, H+7.6, H+16, H+16, H+7.6, H, H+22.6, H+22.6)
" 수직2회선 -4B,GW1,2	(-7.3, -8.3, -6.7, 6.7, 8.3, 7.3, -6.7, 6.7)	(H, H+7.7, H+16.3, H+16.3, H+7.7, H, H+24.6, H+24.6)

여기서 X, Y 는 각상 및 가공지선의 좌표치이며 H 는 최하단 선로의 지상고 높이를 나타낸다.

3. 자계 측정방법

본 측정에 사용된 계측기는 미국 EPRI에서 개발된 모델명 EMDEXII를 사용하였으며 X, Y, Z축 방향을 측정할 수 있는 구조이다. 여기에서는 송전선로의 자계 측정 방향을 선로길이 방향이 Z, 이와 수직인 횡방향이

X, 지면과 수직방향이 Y로 표기하였다.

전자계 측정위치는 지표면으로부터 1[m]되는 지점에서 측정하는데 이 지점은 전자계가 인체에 미치는 영향에 가장 밀접하므로 ANSI/IEEE 에도 기준화 되어 있다.⁽⁵⁾ 측정지역은 철탑사이의 가장 낮은 지점인 버텍스를 택하였으며 비교적 평탄하고 인가가 가까운 지역을 선정하였다. 송전선로하에서 최대자계가 발생하는 곳은 $I/H[A/m]$ 에 따라 차이가 있으나 일반적으로 선로의 중앙지점이다.

4. 자계측정 결과분석

송전선로하에서 자계크기를 변화시키는 변수는 선로의 파라미터, 즉 선로의 상배열, 도체수, 상간격 및 회선간거리 등이 있으며 또한 전류의 크기와 부하전류의 불평형 조건, 주위의 환경등 다양하다. 식 (4), (5)에서 알수 있듯이 자계크기는 $B \propto (I/H)$ 의 관계가 성립되기 때문에 일정 선로하에서 측정지점인 $p(0,1)$ 에서 측정된 전류와 자계의 관계는 직선식으로 표기될 수 있다. 다만 측정지점 좌표에서 Y축을 변화시켰을 경우 직선식의 기울기는 다를수 있기 때문에 그 선로 높이변화에 따른 기울기의 관계식은 많은 측정데이터가 요구되나 계산식에 의해 구하려면 EMFCALC⁽⁶⁾, BPA EMF Program, CDEGS 등 전자계프로그램을 이용할 수 있다.

본 연구에서는 각 선로별로 측정지점인 $p(0,1)$ 에서의 전류와 자계크기의 상관관계를 측정하고 이를 계산식과 비교, 분석하였다. 이러한 조건하에서는 상간거리(Y좌표 변화에 따른 전류-자계 기울기는 변함이 없으나 회선간(X좌표)변화시는 기울기가 변함을 알 수 있다.

4.1 장기간 측정대상물의 결과분석

송전선로 계통의 주간선 선로로써 특징시간대를 제외하면 계통운용상 부하전류가 거의 일정하기 때문에 자계 변화를 구하기 위해서는 장기간이 소요된다. 345kV 수직2회선 4도체 및 2도체와 154kV수직2회선 2도체를 상선로로 정하여 측정하였고 측정조건은 각 상 불평형전류는 고려치 않았다.

그림 3은 345kV 4도체인 청양T/L의 전류크기에 따른 자계변화를 도시한 것으로 측정전류 범위는 450~780[A 상], 자계범위는 $(12.8 \sim 23.2) \times 10^{-7}$ [T], 최저지상고(H)는 24.1 [m]이며 측정기간은 '98.1-3월, 실측치를 프롯팅하여 실선으로 측정치, 점선으로 계산치를 나타냈다. 이때 실측치기울기식은 식(9), 계산식은 식(10) 같다.

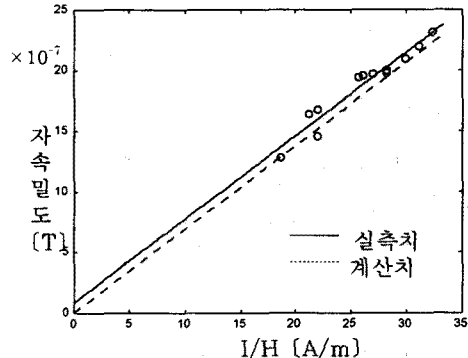


그림 3. 345kV청양T/L의 전류-자계변화

Fig 3. Current' and Magnetic Field' Variation of ChongYang T/L

$$\text{실측치 } B_{mea} = 0.6890 \left(\frac{I}{H} \right) + 0.8359 \quad \text{----}(9)$$

$$\text{계산치 } B_{cal} = 0.6893 \left(\frac{I}{H} \right) \quad \text{----}(10)$$

이 결과 실측치와 계산치의 기울기는 거의 비슷함으로

철탑형상의 파라메타가 비슷하게 일치함을 알 수 있고 전류치 0 값에서 측정자계 1×10^{-7} [T]정도 발생된 것은 각상, 각 회선간 불평형전류에 의한 영상분의 영향과 주위의 자연자계, 도체형상의 차이에서 오는 자계의 증가분등 다양한 요소에 의해 나타날 수 있으나 그 크기 및 영향에 관해서는 아직 명확한 연구결과가 없다. 본 연구에서 측정된 6개 대상선로 모두 이러한 현상은 동일하게 나타났다.

345kV 수직2회선2도체인 청원 #1.2 T/L의 측정결과 식(11), 식(12)로 나타내며 철탑의 좌표는 표1과 같다.

$$\text{실측치: } B_{mea} = 0.6173 \left(\frac{I}{H} \right) + 0.9264 \text{ ----(11)}$$

$$\text{계산치: } B_{cal} = 0.7092 \left(\frac{I}{H} \right) \text{ ----(12)}$$

이 식에서 알수 있듯이 계산치의 기울기가 측정치보다 큰 것은 철탑파라메타의 회선간 거리가 실제로 좌표치보다 좁아졌음을 의미한다.

154kV 수직2회선2도체인 청봉 #1.2 T/L의 측정결과 식(13), 식(14)와 같이 좌표는 표1과 같다.

$$\text{실측치: } B_{mea} = 0.6318 \left(\frac{I}{H} \right) + 2.6458 \text{ ----(13)}$$

$$\text{계산치: } B_{cal} = 0.608 \left(\frac{I}{H} \right) \text{ ----(14)}$$

여기에서는 이 선로의 주변 50[m]지점에 345kV선로 위치하고 있어 이 영향에 의한 자계로 자계크기가 큼을 알수 있다.

4.2 단기간 측정대상물의 결과분석

측정 대상선로가 변전소로부터 수용가로 인입되는 수용가선로이며 주로 아크로등 대형부하를 사용하고 있어 부하변동이 주기적으로 큰 변동이 있어 자계의 변화를 쉽게 관찰할 수 있다. 그러나 짧은 시간에 부하변동이 심하여 측정오차의 범위가 다소 크게 나타남으로 많은 측정데이터가 요구된다. 본 측정에서는 100-200개 정도의 데이터를 프롯팅하여 그 기울기를 도출하였다.⁽⁷⁾ 이러한 수용가 선로의 철탑형태는 삼각1회선, 수직1회선 수평1회선이 주를 이루고 있어 계통선로와는 그 형태가 다르다.

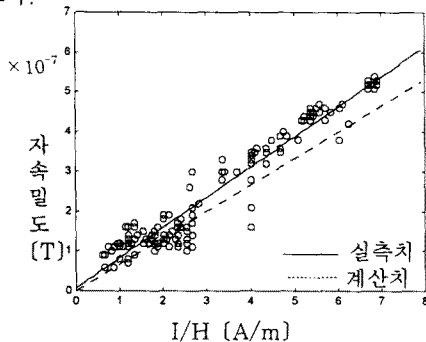


그림 4. 154kV신송T/L의 전류-자계변화

Fig 3. Current and Magnetic Field Variation of ShinSong T/L

그림 4는 154kV 단도체인 신송T/L의 전류크기에 따른 자계변화를 도시한 것으로 측정전류 범위는 9~103[A/상], 자계범위는 $(0.6 \sim 5.4) \times 10^{-7}$ [T], 최저지높이(H)는 14.9 [m]이며 실선으로 측정치, 점선으로 산치를 나타냈다. 철탑의 좌표는 표1에 나타났으며 이때 측정기울기식은 식(15), 계산식은 식(16)과 같다.

$$\text{실측치: } B_{mea} = 0.7579 \left(\frac{I}{H} \right) + 0.0745 \text{ ----(15)}$$

$$\text{계산치: } B_{cal} = 0.6645 \left(\frac{I}{H} \right) \text{ ----(16)}$$

154kV 삼각1회선단도체인 환영철강 T/L의 측정결과

는 식(17), 식(18)로 나타났다.

$$\text{실측치: } B_{mea} = 1.0238 \left(\frac{I}{H} \right) + 0.4024 \text{ ----(17)}$$

$$\text{계산치: } B_{cal} = 0.8927 \left(\frac{I}{H} \right) \text{ ----(18)}$$

154kV 수평1회선단도체인 기아특수강T/L의 측정결과는 식(19), 식(20)으로 나타났다.

$$\text{실측치: } B_{mea} = 0.7383 \left(\frac{I}{H} \right) + 10.0937 \text{ ----(19)}$$

$$\text{계산치: } B_{cal} = 0.6928 \left(\frac{I}{H} \right) \text{ ----(20)}$$

수용가선로는 측정결과에서 보듯이 파라메타의 편차가 일반 선로보다는 다소 큰 것으로 예상된다. 따라서 실측치와 계산치의 기울기는 약간 다르게 나타났다.

그림 5는 식(9)을 이용하여 실제로 345kV 청양T/L 1997.1-1997.12월의 1년간의 연간자계 노출량을 도시한다. 그 선로의 전류치를 대입하여 자계의크기를 구하고 이를 일일 최대 및 최소로 구분하여 나타낸 것으로 초고압 선로하에 노출되는 평균자계의 크기는 최대평균치가 28.9×10^{-7} [T]를 유지하고 있음을 알수 있다.

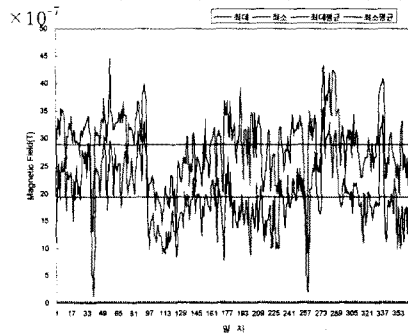


그림 5. 연간자계변화 추이(345kV 청양T/L)

Fig 5. Shift of Magnetic Field Variation for a Year

5. 결 론

최근 민원의 대상이 되고 있는 초고압 송전선로의 자계노출량에 대해 발생이론을 정립하고 실측하여 비교, 분석 하였다. 실제로 국내 송전선로의 대표적인 154kV 345kV 철탑을 형상별로 구분, 각 선로에서 발생되는 전류-자계의 상관관계를 측정하여 계산치와 비교, 분석한 결과 5~10%정도 편차가 발생하였는데 그 주된 원인은 철탑파라메타의 차이 이외도 상 불평형과 주변자계의 영향일 것으로 생각된다. 여기에서 도출된 측정식을 이용하여 실제 선로에서 발생된 연간 자계노출량을 산출하여 그 평균크기를 알아 보았다.

이 연구결과는 자계가 인체에 미치는 영향연구 및 자계 기준치 정립에 중요한 자료가 될 것으로 본다.

(참 고 문 헌)

- [1] John, Douglas " Managing Magnetic Fields " EPRI Journal pp 7-13, July/Aug. 1993
- [2] T.Dan Bracken 외 4명, " Magnetic Field Exposure Among Utility Workers " Bioelectromagnetics Journal No 16, pp 216-226, 1995
- [3] CRIEPI " 商用周波磁界に關する測定器校正法の提案と磁界測定マニュアル " T94058, 1995. 5
- [4] 한진 " 송전철탑 설계표준화 용역 최종보고서 " 1990
- [5] IEEE, "Measurements of power frequency Magnetic Fields away from power lines ", A report of the IEEE Magnetic Fields Task Force, Vol 6, No 2, April 1991
- [6] 김상범 외2명 "송전선로 전자계 계산프로그램"한전, 1997.
- [7] 조성배,이은용"송전선로에서 전류와자계의 상관관계분석 " 대한전기학회 '97년 추계학술대회논문집, pp 3-5, 1997. 11