

초고압 송전선로에서 가스관에 미치는 유도 장해 해석

이승연\*, 고은영\*, 윤석무\*\*, 박남옥\*\*\*, 신명철\*  
 성균관대학교\*, 대덕대학교\*\*, 전기연구소\*\*\*

Analysis of Inductive Interference  
 from EHV Transmission to buried Gas Pipelines

Seung-Youn Lee\*, Eun-Young Ko\*, Myung-Chul Shin\*, Suk-Moo Yun\*\*, Nam-ok Park\*\*\*  
 Sungkyunkwan Univ\*., Daeduk Univ\*\*, KEPRI\*\*\*

**Abstract** - In this paper, we analyze the inductive coupling between overhead power transmission lines and neighbouring gas pipelines or other conductors, when they parallel to a line section in a phase-to-earth fault is assumed on the transmission line. A numerical procedure employing the finite-element method(FEM) is used in conjunction with Faraday's law, in order to predict the current in a faulted transmission line, as well as the induced voltages across points on a pipeline running parallel to the faulted line and remote earth. The results lead to conclusion that may be useful to power system engineers.

1. 서 론

전력수요가 증가함에 따라 전압이 초고압으로 승압 되고, 도시의 밀집화와 광역화로 인해 부대 설비의 설치에 필요한 공동 공간은 점차 협소해 지는 추세로 송전선로 부근에 매설되는 도체가 늘어나 여러 환경적 장애가 발생하고 있다. 전기환경장해는 전계와 자계의 두 영향으로 알려져있고 현재에도 많은 연구가 진행되고 있다. 송전선 근방에는 60Hz를 기본 주파수로 하는 저주파수 대역의 전자장이 형성된다. 초고압 송전선로에는 고압 대전류가 흐르기 때문에 더 강한 전자장이 형성된다. 이때 교류 자계에 의한 유기전력이 송전선 근방에 있는 도체 표면에 유기된다. 이와 같은 현상은 전력계통이 동작하는 한 지속적으로 도전성 배설 배관에 전압과 전류가 유기된다. 이때 배관에는 부식이 촉진되고, 피방식 시설물의 경우 교류전류가 흐르면, 消極현상이 발생하므로 방식 소요전류가 커지고, 양극의 소모가 촉진됨으로 인해 설계수명을 다 채우지 못한다. 또한 배관에 유도된 교류전압의 경우, 전위 측정시에 측정기기를 손상시키거나, 유지/보수 작업시에 작업자에게 위험을 끼칠 뿐만 아니라 가스관 같은 경우 누출사고 시에 아크를 발생시켜 화재원인을 제공할 수 있으므로 대형화재의 원인이 될 수도 있다.

본 논문에서는 초고압 송전선로 주변에 가스관이 매설되었다는 가정하에 송전선로 주변의 자계를 유한요소법으로 해석하고, 이를 이용하여 라인에 흐르는 고장전류를 구한 다음, 가스관에 유도되는 전압을 구한다. 계통이 정상상태일 때 전자계 해석은 많은 연구가 이루어져왔으므로 본 논문에서는 1선 지락사고가 발생했을 때를 해석한다. 고장전류와 유도전압은 유한요소법의 결과로 얻어지는 자기 벡터 포텐셜(Magnetic Vector Potential)과 이를 바탕으로 얻어지는 와전류 분포, 여기에 패러데이 법칙을 이용하여 계산한다.

2. 본 론

2.1 해석모델

본 연구에서는 765kV 2회선 송전선로의 1선지락사

고시를 모델링 하였다. 1회선은 정상상태로 운전되고 있고 다른 회선은 지락사고가 발생한 상태이다. 이때 송전선로 주위에 매설된 가스관이 평행하게 지나간다고 가정하였다. 본 논문의 이론적 바탕은 Satsios(4)의 논문을 우리나라 전력계통에 적용한것이다. 그림 1에서는 해석대상 영역의 단면도를 그리고 있다.

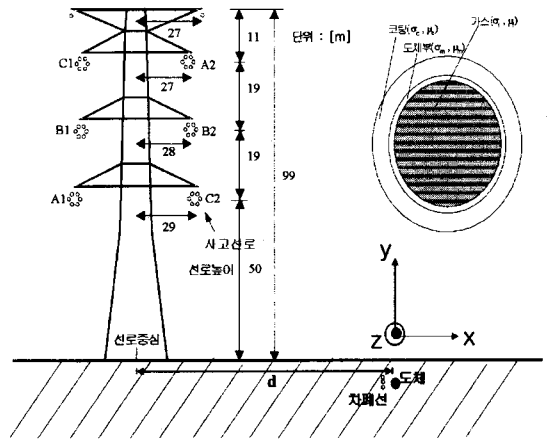


그림 1 765kV 송전선로 해석 모델

송전선로는 765kV 懸垂형 철탑을 기준으로 했다. 철탑의 최고 높이는 99m이고 상간 거리는 19m이다. 좌측의 1회선은 정상상태로 운전되는 회선이고, 우측 회선의 제일 낮은 지점(50m)에서 지락사고가 발생했다고 가정한다. 정상상태로 운전되고 있는 부분의 전류는 600[A]로 가정하였는데 이는 정전압방식의 계통 형태라 전류를 정확히 알 수가 없어 현재 345kV 송전선로에 흐르는 전류의 평균값보다 약간 작게 설정한 것이다. 철탑의 중심에서 d만큼 떨어져 있는 부분에 가스관이 매설되어 있다. 가스관은 도체부분과 피막부분 그리고 가스가 흐르는 부분으로 구성되어 있는데, 도체 부분의 도전율은  $\sigma_m = 7 \times 10^6$  [S/m], 비투자율은  $\mu_m = 250$ , 코팅부분은 폴리 에틸렌 계의 피복재료  $\sigma_c = 0, \mu_c = 1$  이다. 배관의 외경은 800mm, 피복두께는 20mm, 배관두께는 20mm로 가정했다. 차폐선으로 사용되는 금속선은 나선으로 된 알루미늄 재질로서  $3.82 \times 10^7$ 의 전도도를 갖고 있다. 대지는 일반적인 점토 토양을 가정하여 100Ω의 비저항을 적용했다.

그림2는 사고가 난 회선의 회로도를 개략적으로 표현하였다. 무부하인 경우로 사고가 발생한 상을 제외하고 다른 라인에는 상전류가 흐르지 않으므로 고장전류 If는 ABCFGA의 경로를 흐른다고 가정한다.

송전단의 전압은 765kV, source 임피던스  $Z_s = 4 + j50\Omega$ 이고, 중성점 접지저항은  $R_g = 0.2\Omega$ 이다. 사

고 지점의 저항은  $R_r = 20\Omega$ 으로 가정했다. A서부터 B까지의 길이는 25km이고 B지점에서 지락사고가 발생하였다. BC부분은 지락사고 지점이고, CF는 기준 전위면으로 각 접지부분을 이은 부분이다.

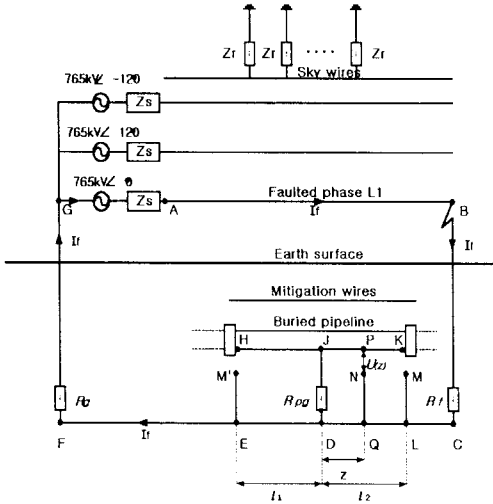


그림 2 1선 지락사고가 발생했을 때의 회로도

가스관의 접합부분인 H와 K는 음극 방식처리가 되어있고 J지점에서 접지 되어 있다. 가스관 접지저항은  $2\Omega$ 이다. 접지부분에서 H 또는 K 지점까지의 거리는 각각 12.5km로 가스관과 송전선로가 병행하는 거리는 전체 25km이다. PN은 가스관 전압을 계산하는 곳으로 가스관 접지에서 거리에 비례하게 전압이 계산될 것이다.

### 2.2 유한요소 공식화

유한요소해석은 그림 1에서보듯 x-y 2차원 평면으로 해석한다. Z방향으로 전류가 흐른다면 전 전류 밀도  $\vec{J}$ 가 z 축만의 방향으로  $\vec{J}_z$  존재하고, 자기 벡터 포텐셜 역시 z 축만의 요소  $\vec{A}_z$ 를 가진다. 맥스웰 방정식에 기초하여 2차원 영역문제에 방정식을 세우면,

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \left[ \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} \right] + \vec{J}_z = 0 \quad (1)$$

이고, 여기서 전 전류밀도  $\vec{J}_z$ 는 전원 전류밀도  $\vec{J}_{sz}$ 와 유도 와전류밀도  $\vec{J}_{ez}$  성분으로 구성된다. 와전류밀도는 식(2)와 같이 정의된다.

$$\vec{J}_z = \vec{J}_{sz} + \vec{J}_{ez} = \vec{J}_{sz} + (-j\omega\sigma\vec{A}_z) \quad (2)$$

전 전류밀도를 적분하면 상에 흐르는 전류와 같다.

$$\int \int J_z ds = I \quad (3)$$

식(1)와 식(2)에서 해석영역의 2차원 지배 방정식을 정형화시키면 식(4)와 같다.

$$\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \left[ \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} \right] - j\omega\sigma A_z + J_{sz} = 0 \quad (4)$$

이것을 유한요소법에 적용하여 해석한다.

### 2.3 고장 전류 해석

1선 지락 사고가 발생했을 때 나머지 상에는 전류는 흐르지 않고 전압만 존재한다. 따라서 그림2는 그림3과 같이 간략화 될 수 있다.

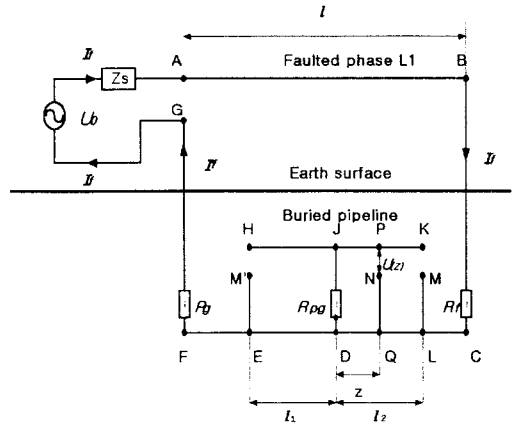


그림 3 사고선로의 회로도

고장전류는 ABCLEDFGA의 경로를 지난다고 가정한다. 폐경로 ABCFGA에 유한요소법을 적용한 계산값과 Faraday 법칙의 적용으로 결정된다. 패러데이 법칙은

$$\oint \text{Edl} + \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

이다.  $\Phi$ 는 폐경로 ABCFGA의 자속이다.

$$\Phi = A_z l \quad (6)$$

이제 식(5)을 각 부분별로 전개해 보면

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CF} + U_{FG} + U_{GA} + j\omega\Phi = 0 \quad (7)$$

이고, 여기서 A점과 B점의 전압  $U_{AB}$ 는 전체 E의 적분으로 정의할수 있다. 이 전압은 시간에 따라 변하며 A,B점 뿐만아니라 전체 경로에도 관련이 있다. 변위 전류가 무시된다면 AB에 흐르는 전류는 도체 표면의 도전율과 관계가 있다. 따라서 아래와 같이 표현할수 있다.

$$U_{AB} = \int_A^B \text{Edl} = \frac{J_z l}{\sigma} \quad (8)$$

이 때  $J_z$ ,  $\sigma$ 와  $l$ 은 사고선로의 전체전류밀도, 도전율, 도체 길이의 Z방향의 성분이다.  $U_{BC}$ 는 지락 사고시 대지전위이며 다음 수식으로 표현된다

$$U_{BC} = \int_B^C \text{Edl} = I_f R_f \quad (9)$$

$R_f$ 는 고장 저항이고  $I_f$ 는 고장전류이다. CF는 기준 전위면이므로

$$U_{CF} = 0 \quad (10)$$

이고, FG와 GA의 전압은 다음과 같다.

$$U_{FG} = I_f R_g \quad (11)$$

$$U_{GA} = -U_0 + I_f Z_s \quad (12)$$

이다. 식(7)에 식(8~12)을 대입하여 전원전압  $U_0$ 에 대해 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$U_0 = I_f (R_g + Z_s + R_f) + \left( \frac{J_z l}{\sigma} + jA_z \omega l \right) \quad (13)$$

여기서 전류를  $I_{1b} = 1\angle 0^\circ A$ 라고 가정하고 식(13)에 대입하면 기본 전압  $U_b$ 는 다음과 같다.

$$U_b = I_{1b} (R_g + Z_s + R_f) + \left( \frac{J_{2b} l}{\sigma} + jA_{2b} \omega l \right) \quad (14)$$

여기서  $I_{zb}$ 와  $A_{zb}$ 는  $I_{10} = 1A \angle 0^\circ$ 가 흐를 때 선로 표면의 전류밀도와 magnetic vector potential이다. 마지막으로 고장전류  $I_f$ 는 다음 수식에 의해 결정된다.

$$I_f = \frac{U_o}{U_b} I_{10} \quad (15)$$

$U_o$ 는 주어진 전압이고, 고장전류  $I_f$ 를 계산할 때는 매설된 가스관과 대지 특성을 고려해야한다.

### 2.4 가스관 유도 전압

가스관은 J점에서 접지저항  $R_{Jg}$ 로 접지 되어 있고 양쪽 끝은 접지가 안된 연결지점이다. PNQDJP 경로에 패러데이 법칙을 적용하면 P와 N사이에 전압이 걸리며 이것은 거리 z의 함수이다. 이것을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$U_{PN} = jA_z \omega z \quad (16)$$

여기서  $A_z$ 는 고장선로와 정상선로의 자기벡터 포텐셜이다. 이 전압의 최대값은 K점  $U_{KM} = jA_z \omega l_2$ 이다. J를 기준으로 가스관은 대칭되므로 양쪽 끝 KJ와 HJ에 걸리는 전압은 동일하다. 가스관이 연결된 다른 부분을 고려한다면 같은 위치에 접지가 되어있으므로 그림 4와 같이 양쪽 끝이 저항  $R_{Jg}$ 로 접지된 상태로 생각할 수 있다. 여기서 전류  $I_e$ 가 흐르는 HKLQDEH라는 폐경로를 생각할 수 있다.

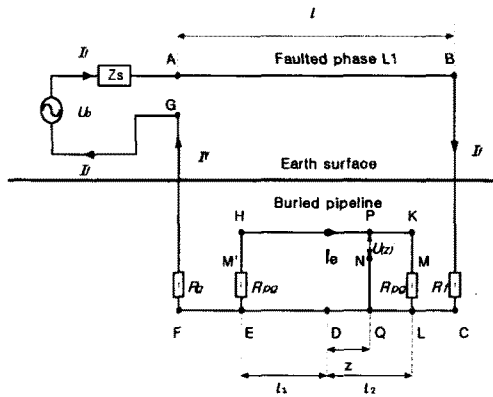


그림 4 가스관 양끝을 저항접지한 그림

여기서 경로 HKLQDEH와 PKLQNP에 식(5)를 적용하면 P와 N사이에 전압은

$$U_{PN} = R_{Jg} I_e \left( \frac{2z}{l_1 + l_2} - 1 \right) \quad (17)$$

이다. 이 식은 거리 z의 함수이고 H점에 K점까지 이동하며 변한다.

### 2.5 해석결과

식(15)의 계산 결과 고장전류는  $3015 \angle 11.36^\circ [A]$ 이다. 가스관의 위치를 선로중심에서 100m 떨어져 있다고 가정하고 유도전압을 계산하면 0[V]에서  $\pm 303 \angle 171.1^\circ [V]$ 로 거리에 비례해서 그 값이 달라진다. 차폐선이 있을 때 가스관 전압의 계산 지점은 접지 부분에서 10km 떨어져 있는 지점이다. 선로 중심에서 100m 떨어져 있는 가스관에 유도되는 전압은 차폐선이 없을 때  $60 \angle 171.1^\circ [V]$ 로 계산되었다. 알루미늄 차폐선이 한 개 있을 때  $49.58 \angle 168.4^\circ [V]$ 로 감소하고, 세 개 있을 때는  $38.44 \angle 168.5^\circ [V]$ 로 가스관에 발생하는 유도 전압이 감소한다. 도선율이 알루미늄보다 좋은 구리를 사용하면 유도전압이 조금더 감소 하였다. 표 1에서 차폐선에 따

른 가스관 유도전압의 감소를 표기하였다.

도체 종류	갯 수	유도 전압
없을때	0	$60 \angle 171.1^\circ [V]$
al	1	$49.58 \angle 168.4^\circ [V]$
	2	$46.61 \angle 167.5^\circ [V]$
	3	$38.44 \angle 168.5^\circ [V]$
cu	1	$49.55 \angle 168.2^\circ [V]$
	3	$38.27 \angle 168.2^\circ [V]$

표 1 차폐선과 가스관 유도전압

그림 5는 1선 지락 지락사고 발생시 송전선로 주변의 자계분포를 나타낸 것이다. 고장전류가 큰 관계로 사고선로에 자계가 집중되는 것을 볼 수 있다.

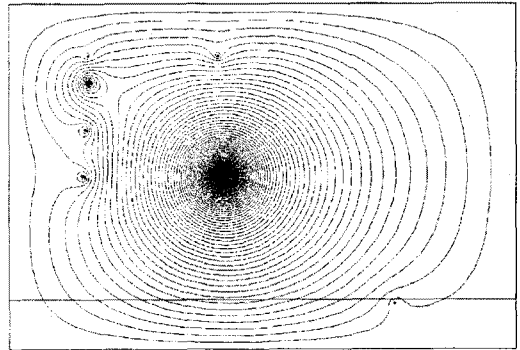


그림 5 송전선로 부근의 자계 분포도

### 3. 결 론

지금까지 유한요소해석을 통해 고장전류와 가스관에 유도되는 전압을 계산해 보았다. 차폐선을 설치하면 송전선로 주변에 매설된 가스관에 미치는 영향을 현저하게 감소시킬 수 있다는 것을 알았다. 하지만 2차원 해석시 자계가 시간에 따라 변화하는 문제를 해결하지 못했고, 입력 전류 역시 이상적인 경우이므로 부하에 따라 계속하여 전류가 변하는 실제상황과 같다고 보기는 어렵다. 보다 정확한 데이터 입력과 시간에 따른 해석을 보완한다면 송전선로 주변에 매설된 배관에 미치는 영향을 예측 가능할 것이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] J. R Carson, "Wave Propagation in Overhead aWires With Ground Return", Bell System Technical Journal, Volume 5, October 1926, pp.539-554.
- [2] F. Pollaczek "On the Field Produced by an Infinitely Long wire Carrying Alternating Current", Electriche Nachrichten technik, Volume 3, 1929, No 9, pp. 339-359(in German)
- [3] E.D. Sunde, "Earth Conduction Effects in Transmission Systems", 2nd edition, Dover Publications, new york, 1968.
- [4] Satsios KJ, "CURRENTS AND VOLTAGES INDUCED DURING EARTH FAULTS IN A SYSTEM CONSISTING OF A TRANSMISSION LINE AND A PARALLEL PIPELINE" European Transactions on Electrical Power ; V.8 N.3 ; 1998-06-01 ; Labridis DP, Dokopoulos PS
- [5] se-yong. Choi, "Analysis of the inductive interference on the conductor around power system KIEE '99 Annual Autumn Conference (C) 1999.11 pt.C, pp.1034-1037
- [6] W.K. KIM, "A Summary of KEPCO 765KV transmission line design:KIEE 99 Summer Conference (C) 1998.7 pt.E, pp.1574-1577