An Investigation of Induced Voltages to an Underground Gas Pipeline from an Overhead Transmission Line

Hiroshi Isogai Student Member (Doshisha University, dtd0117@mail4.doshisha.ac.jp)

Akihiro Ametnai Member (Doshisha University, aametani@mail.doshisha.ac.jp)

Yuji Hosokawa Non-member (Tokyo Gas Co., yuji@tokyo-gas.co.jp)

Keywords: induced voltage, gas pipeline, overhead line, mutual impedance, EMTP

This paper investigates induced voltage characteristics to a buried gas pipeline from an overhead power line illustrated in Figure 1 based on a modeling method developed by the authors by using EMTP.

It is confirmed that EMTP simulation results for a single phase power line agree well with an well-known formula of an induced voltage. A voltage on a pipeline section with no parallel power line is nearly the same as that with a parallel power line. This fact follows an electrostatic theory.

Table 1 shows an EMTP simulation result for a vertical twin-circuit power line. It is observed that the induced voltages depends significantly on the power line configuration, a 3-phase horizontal

line results in the highest induced voltage and that by a vertical twin-circuit line is smaller by about 20% than that of a vertical single-circuit line. The results are confirmed by hand calculations based on the well-known formula, and are readily explained by a vector sum of a magnetic flux around the pipeline.

Figure 2 shows a simulation result corresponding to a measured result in an actual gas pipeline with the total length of about 20 km partially parallel to 66 kV and 500 kV power lines. The simulation result agrees satisfactory with the measured result, 1.76 V to 2.48 V, and thus the accuracy of the modeling method is confirmed to be satisfactory.

Fig. 1. A model circuit of a power line and gas pipeline system

Table 1. Simulation results on a multiphase line

case	y [m]	$V_{G1} \angle \theta_1$ [V]	$V_{G2} \angle \theta_2$ [V]	$V_m \angle \theta_m$ [V]
31	-100.0	$1.52 \angle -158.1^\circ$	$1.29 \angle -155.8^\circ$	$0.24 \angle 9.3^\circ$
32	-28.0	$4.18 \angle -176.2^\circ$	$4.22 \angle 3.95^\circ$	$8.40 \angle 3.9^\circ$
33	-14.0	$5.90 \angle -175.4^\circ$	$7.30 \angle -2.55^\circ$	$13.1 \angle 0.6^\circ$
34	0.0	$3.16 \angle 116.1^\circ$	$3.07 \angle 118.6^\circ$	$0.16 \angle -119.1^\circ$
35	14.0	$6.67 \angle 6.37^\circ$	$6.55 \angle -171.4^\circ$	$13.2 \angle -172.5^\circ$
36	28.0	$4.28 \angle 3.59^\circ$	$4.18 \angle -175.3^\circ$	$8.46 \angle -175.9^\circ$
37	100.0	$1.41 \angle 13.8^\circ$	$1.17 \angle 21.2^\circ$	$0.29 \angle 162.7^\circ$

Fig. 2. Simulation results

架空送電線から地中ガスパイプラインへの誘導電圧に関する一検討

学生員 磯貝 浩* 正員 雨谷 昭弘*

非会員 細川 裕司**

An Investigation of Induced Voltages to an Underground Gas Pipeline from an Overhead Transmission Line

Hiroshi Isogai*, Student Member, Akihiro Ametani*, Member, Yuji Hosokawa**, Non-member

This paper has investigated induced voltages characteristics from an overhead transmission line to a buried gas pipeline by applying a modeling method of the induced voltages proposed by the authors. EMTP simulation results agree with analytical results obtained from a well-known formula. The induced voltages are significantly dependent on the configuration of an overhead line. A horizontal line induces the largest voltage to the gas pipeline, and an induced voltage by a vertical twin-circuit line is smaller by about 20% than that by a vertical single-circuit line.

キーワード：誘導電圧，ガスパイプライン，架空線，相互インピーダンス，EMTP

Keywords: induced voltage, gas pipeline, overhead line, mutual impedance, EMTP

1. 緒 言

地中に埋設されたガスパイプラインは，需要家へ供給する経路として広く使用されている。ガスパイプラインの鋼管塗覆装に損傷が生じた場合，損傷部からの電気腐食などによってガスパイプ本体に損傷を与え，大事故に至る危険性がある⁽¹⁾。この電気腐食の原因として，鉄道等による迷走電流によるものと，架空電力線からの交流誘導によるものがある。前者については多くの研究が行われ，外部電源による電圧印加等の対策が講じられている。一方，後者のガスパイプへの交流誘導電圧については低接地措置等による対策が講じられているものの，現象に関する検討が十分なされておらず，その予測および特性の解明が求められている。また地中に埋設されたガスパイプラインの電圧測定は困難であり，誘導電圧シミュレーション手法の確立が急務となっている。

そこで本論文ではガスパイプ交流誘導電圧の特性を明らかにするため，まずシミュレーション手法を確立する。ガスパイプラインは中空円筒状の導体部およびその外部の絶縁体から成る地中ケーブルとして模擬することで，その数値シミュレーションが可能となる⁽²⁾。その際，地中ケー

ブルの定数は汎用回路解析プログラム EMTP⁽³⁾ のサブルーチンである Cable Parameters⁽⁴⁾ を用いることで容易に求まる。また，架空線と地中ケーブルの相互インピーダンスは Pollaczek⁽⁵⁾ により厳密解が与えられているが，無限積分を含み数値的に極めて不安定である。一方，大地の複素透過深度 h_e が地中ケーブル埋設深さよりも大となる条件下では，その相互インピーダンスは Cable Parameters により近似計算が可能である⁽⁶⁾。

次に実測結果との比較等により開発したモデル回路の妥当性およびシミュレーション精度について検討する。まず架空電力線 1 条の最も基本的な構成について考察し，3 相水平配列線路，3 相垂直配列線路および 3 相 2 回線路の場合のガスパイプライン交流誘導電圧をそれぞれ比較する。さらに実系統に対応するモデル系統を対象として，ガスパイプ交流誘導電圧の予測を行う⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

2. 架空送電線およびガスパイプラインの分布定数線路模擬

ガスパイプラインの断面図を図 1 に示す。ガスパイプは鋼管の周囲を塗覆装と呼ばれる保護体でコーティングされている。ここでガスパイプラインを電気素子と考えると，中空円筒状の導体部およびその外部絶縁体から成る地中ケーブルとして模擬できる。本章では，ガスパイプラインを分布定数線路として模擬する場合に必要なパラメータについて検討し，モデル化手法を確立する。

〈2・1〉 ガスパイプラインの分布定数線路モデル 分布定数線路の性質を決定する特性インピーダンス Z_0 ，伝搬定数 Γ は次式で与えられる⁽⁹⁾。

* 同志社大学 工学部
〒610-0321 京田辺市多々羅
Faculty of Engineering, Doshisha University
Kyo-Tanabe, Kyoto 610-0321

** 東京ガス (株) 導管部
〒105-8527 東京都港区海岸 1-5-20
Dept. Pipeline, Tokyo Gas Co.
1-5-20, Kaigan, Minato-ku, Tokyo 105-8527

$\rho_{gp} = 1.5 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$, $\mu_{gp} = 280$, $\epsilon_{gi} = 2.3$, $\rho_e = 50 \Omega\text{m}$,
 $r_{g1} = 191.3\text{mm}$, $r_{g2} = 203.2\text{mm}$, $r_{g3} = 206.4\text{mm}$, $h_g = -1.8\text{m}$

図1 ガスパイプライン断面図

Fig. 1. Cross-section of a gas pipeline.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \dots \dots \dots (1)$$

$$\Gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \dots \dots \dots (2)$$

ここで直列インピーダンス ($R + j\omega L$), および並列アドミタンス ($G + j\omega C$) のキャパシタンス C は EMTP のサブルーチンである Cable Parameters⁽⁴⁾ を用いて図1の物理定数より求められる。

また並列アドミタンス ($G + j\omega C$) 中の G を用いてガスパイプライン塗覆装の漏れコンダクタンスを模擬できると考えられる。ガスパイプラインの塗覆装にはピンホールなどからの大地への漏れ電流が存在することが知られており、文献(2)でも検討されている。ただしこの漏れコンダクタンスの値はガスパイプライン接地抵抗値に比べて非常に大となっているのでほぼ絶縁されているとみなせる。

〈2・2〉 架空電力線とガスパイプラインの相互インピーダンス 図2に架空電力線とガスパイプラインの配置を示す。なお、電力線半径 $r_p = 16.77\text{cm}$ は 500kV 送電線の1相4導体(表4参照)の等価半径である。本節では図に示す計算条件で架空電力線とガスパイプラインの相互インピーダンスについて検討する。架空線と地中ケーブルの相互インピーダンスは Pollaczek⁽⁵⁾ により厳密解が与えられているが、無限積分を含み数値的に極めて不安定である。一方、次式に示す大地の複素透過深度 h_e が地中ケーブル埋設深さよりも大となる条件下では、その相互インピーダンスは Cable Parameters により近似計算が可能である⁽⁶⁾。

$$h_e = \sqrt{\frac{\rho_e}{j\omega\mu_0}} \dots \dots \dots (3)$$

ガスパイプラインの埋設深さ h_g が $h_g < |h_e|$ となるときの Cable Parameters を用いて相互インピーダンスを近似的に求めることができる。ここで(3)式に今回の計算条件 $\rho_e = 50 [\Omega\text{m}]$, $h_e = h_g = 1.8 [\text{m}]$ を代入すると $f = 1.95 [\text{MHz}]$ となる。よって Cable Parameters を用いて 1.95 [MHz] 以下の周波数領域で計算可能である。

〈2・3〉 架空線-ガスパイプラインのモデル回路 図3に架空線-ガスパイプラインのモデル回路を示す。(a) は分

$h = 16[\text{m}]$, $h_g = -1.8[\text{m}]$, $y = 0, 500, 1000[\text{m}]$
 $r_p = 16.77[\text{cm}]$, $\rho_p = 3.18 \times 10^{-8} [\Omega\text{m}]$

図2 電力線・ガスパイプ系

Fig. 2. A power line and gas pipeline system.

(a) A distributed-line model

(b) A lumped-parameter model

図3 電力線・ガスパイプライン系のモデル回路

Fig. 3. A model circuit of a power line and gas pipeline system.

布定数モデル, (b) は集中定数モデルである。図において直列インピーダンス行列 $[Z]$, 並列アドミタンス行列 $[Y]$, 特性インピーダンス行列 $[Z_0]$, および伝搬定数行列 $[\Gamma]$ の各定数は周波数の関数として EMTP Cable Parameters で計算する。これらの定数を用いることにより架空線-ガスパイプラインからなる多導体系を図3のモデル回路で表現することができる。

3. ガスパイプへの交流誘導電圧

〈3・1〉 単相線路 図4(a)に検討対象としたシミュレーション回路, 図4(b)に断面図を示す。ノード G1-G2 区間(距離 x_1)で 500kV 送電線(単相模擬, 地上高 $h_1 = 16\text{m}$)と地中ガスパイプ(埋設深さ $h_g = -1.8\text{m}$)が離隔距離 y で平行している。ガスパイプラインの半径および物理定数は図1と同じである。またノード G2-G3 区間(距離 x_2)はガスパイプのみとし、送電線始端 P1 に電流源 I_0 が接続されている時のガスパイプ端子電圧 V_{Gi} および送電線からの誘導電圧 $\dot{V}_m = \dot{V}_{G2} - \dot{V}_{G1}$ を EMTP シミュレーションにより求め

図4 シミュレーション回路
Fig. 4. A simulation circuit.

表1 単相線路でのシミュレーション条件

Table 1. Simulaiton conditions on a single-phase line.

case	x_1/x_2 [km]	y [m]	I_0 [A]	$Z_m \angle \theta_0$ [Ω /km]	$V_m \angle \theta_m$ [V]
11	0.5/0	500	1k	$0.0431 \angle 41.4^\circ$	$21.5 \angle -138.9^\circ$
12	0.5/0	1000	1k	$0.0174 \angle 18.4^\circ$	$8.7 \angle -161.6^\circ$
13	1.0/0	500	1k	$0.0431 \angle 41.4^\circ$	$21.5 \angle -138.9^\circ$
14	1.0/0	1000	1k	$0.0174 \angle 18.4^\circ$	$17.4 \angle -161.6^\circ$
21	0.5/2	1000	1k	$0.0174 \angle 18.4^\circ$	$8.7 \angle -161.6^\circ$
22	0.5/10	1000	1k	$0.0174 \angle 18.4^\circ$	$8.7 \angle -161.6^\circ$
23	1.0/2	1000	1k	$0.0174 \angle 18.4^\circ$	$17.4 \angle -161.6^\circ$
24	1.0/10	1000	1k	$0.0174 \angle 18.4^\circ$	$17.4 \angle -161.6^\circ$
31	0.5/0	500	500	$0.0431 \angle 41.4^\circ$	$10.8 \angle -138.9^\circ$
32	0.5/0	1000	500	$0.0174 \angle 18.4^\circ$	$4.4 \angle -161.6^\circ$
33	1.0/0	500	500	$0.0431 \angle 41.4^\circ$	$21.6 \angle -138.9^\circ$
34	1.0/0	1000	500	$0.0174 \angle 18.4^\circ$	$8.7 \angle -161.6^\circ$

る。表1に計算条件および送電線とガスパイプラインの相互インピーダンス Z_m および誘導電圧近似解 $V_m = -Z_m I_0$ 、表2にEMTP計算結果を示す。

表2のシミュレーション結果において、交流誘導電圧値は表1に示す周知の近似式 $\dot{V}_m = -\dot{Z}_m \dot{I}_0$ にほぼ一致していることが知られる。またガスパイプ端子電圧値 V_{G1}, V_{G2} も近似式 $V_{G1} \approx V_{G2} \approx Z_m I_0 / 2$ を満足している⁽¹⁰⁾。従って用いたシミュレーション手法は妥当であると考えられる。

表2から、交流誘導電圧は送電線とガスパイプラインの離隔距離、並行区間長さおよび送電線電流値により決定されることがわかる。これは $\dot{V}_m = -\dot{Z}_m \dot{I}_0$ において Z_m が線路長 x_1 と共に増加し、離隔距離と共に減少することからも明らかである。注目すべきは、ノードG3の電圧が送電線との並行区間でのガスパイプ電圧 V_{G1}, V_{G2} とほぼ同一の値となること、および V_{G3} はノードG2-G3間のガスパイプ長 x_2 にあまり依存しないことであろう。過渡現象を考える際、線路の進行波および反射波により電圧分布が決定される。しかし、定常状態では送電線と並行していない区間

表2 単相線路でのシミュレーション結果

Table 2. Simulaiton results on a single-phase line.

(a) Lumped-parameter model				
case	$V_{G1} \angle \theta_1$ [V]	$V_{G2} \angle \theta_2$ [V]	$V_{G3} \angle \theta_3$ [V]	$V_m \angle \theta_m$ [V]
11	$10.7 \angle 40.6^\circ$	$10.7 \angle -139.4^\circ$	—	$21.4 \angle -139.4^\circ$
12	$4.33 \angle 17.6^\circ$	$4.33 \angle -162.4^\circ$	—	$8.7 \angle -162.4^\circ$
13	$21.4 \angle 39.7^\circ$	$21.4 \angle -140.3^\circ$	—	$42.8 \angle -140.3^\circ$
14	$8.64 \angle 16.7^\circ$	$8.64 \angle -163.3^\circ$	—	$17.3 \angle -163.3^\circ$
21	$4.27 \angle 15.8^\circ$	$4.40 \angle -160.7^\circ$	$4.28 \angle -167.2^\circ$	$8.7 \angle -162.4^\circ$
22	$3.89 \angle 10.5^\circ$	$4.82 \angle -156.5^\circ$	$4.05 \angle 174.3^\circ$	$8.7 \angle -162.3^\circ$
23	$8.51 \angle 15.0^\circ$	$8.77 \angle -161.5^\circ$	$8.53 \angle -168.0^\circ$	$17.3 \angle -163.2^\circ$
24	$7.73 \angle 9.77^\circ$	$9.61 \angle -157.2^\circ$	$8.06 \angle 173.6^\circ$	$17.2 \angle -163.0^\circ$
31	$5.37 \angle 40.6^\circ$	$5.37 \angle -139.4^\circ$	—	$10.7 \angle -139.4^\circ$
32	$2.17 \angle 17.6^\circ$	$2.17 \angle -162.4^\circ$	—	$4.3 \angle -162.4^\circ$
33	$10.7 \angle 39.7^\circ$	$10.7 \angle -140.3^\circ$	—	$21.4 \angle -140.3^\circ$
34	$4.32 \angle 16.7^\circ$	$4.32 \angle -163.3^\circ$	—	$8.6 \angle -163.3^\circ$
(b) Distributed-parameter model				
case	$V_{G1} \angle \theta_1$ [V]	$V_{G2} \angle \theta_2$ [V]	$V_{G3} \angle \theta_3$ [V]	$V_m \angle \theta_m$ [V]
11	$10.7 \angle 46.5^\circ$	$10.7 \angle -133.6^\circ$	—	$21.4 \angle -133.6^\circ$
12	$4.32 \angle 23.5^\circ$	$4.32 \angle -156.6^\circ$	—	$8.6 \angle -156.6^\circ$
13	$21.3 \angle 45.7^\circ$	$21.4 \angle -134.5^\circ$	—	$42.7 \angle -134.4^\circ$
14	$8.62 \angle 22.7^\circ$	$8.62 \angle -157.5^\circ$	—	$17.2 \angle -157.4^\circ$
21	$4.29 \angle 21.7^\circ$	$4.34 \angle -154.8^\circ$	$4.28 \angle -161.4^\circ$	$8.6 \angle -156.5^\circ$
22	$4.02 \angle 15.6^\circ$	$4.67 \angle -149.6^\circ$	$4.08 \angle 179.7^\circ$	$8.6 \angle -156.4^\circ$
23	$8.56 \angle 20.9^\circ$	$8.67 \angle -155.7^\circ$	$8.54 \angle -162.3^\circ$	$17.2 \angle -157.4^\circ$
24	$8.01 \angle 14.8^\circ$	$9.31 \angle -150.4^\circ$	$8.14 \angle 178.9^\circ$	$17.2 \angle -157.2^\circ$
31	$5.35 \angle 46.5^\circ$	$5.35 \angle -133.6^\circ$	—	$10.7 \angle -133.6^\circ$
32	$2.16 \angle 23.5^\circ$	$2.16 \angle -156.6^\circ$	—	$4.3 \angle -156.6^\circ$
33	$10.7 \angle 45.7^\circ$	$10.7 \angle -134.5^\circ$	—	$21.4 \angle -134.4^\circ$
34	$4.31 \angle 22.7^\circ$	$4.31 \angle -157.5^\circ$	—	$8.6 \angle -157.4^\circ$

であるノードG2-G3間では交流誘導電圧が発生せず、電気磁気学的に同一導体は同電位となることから、上記の現象が説明できる。

さらに、図3に示す分布定数モデルと集中定数モデルを比較すると、交流誘導電圧の位相に若干の差異が見られるだけであった。今回行ったシミュレーションは定常状態のシミュレーションであり、過渡現象ではないため、集中定数モデルでも十分な精度を得られると考えられる。なお、以下の計算では全て分布定数モデルを用いる。

本計算は送電線1相のみを考えた場合であり、実際には3相、および2回線分の各相電流による誘導電圧のベクトル和になるため、1相のみの場合より誘導電圧は小となる。また、送電線1相のみを対象とした解析は送電線の1線地絡事故に対応するものとして電話線への誘導電圧分野でよく知られている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

次にガスパイプライン交流誘導電圧分布について考察する。図4(a)に示すような長さ x [km] の架空送電線に、大地を帰路とする起誘導電流 I_0 [A] が流れたとき、ガスパイプラインに誘導する電圧分布を求める。ここでガスパイプラインのインピーダンス Z [Ω /km]、アドミタンス Y [S/km] とし、ガスパイプラインと架空電力線との間の相互インピーダンス Z_m [Ω /km] とする。架空電力線電流は電力線各点において同相、同大とし、ガスパイプラインの両端開放とすると、架空-地中導体間の相互アドミタンス Y_m は通常0な

図5 誘導電圧の分布
Fig. 5. Induced voltage distribution.

ので次式が得られる⁽¹¹⁾。

$$V = \frac{I_0 Z_m}{\Gamma} \frac{\cosh \Gamma(l-x) - \cosh \Gamma x}{\sinh \Gamma l} \quad (4)$$

表1 case 13の条件（ただしガスパイプラインの両端は開放）での線路長100[m]間隔の誘導電圧シミュレーション結果と上式による解析結果を図5に示す。図よりガスパイプライン両端での電圧が最も高く、中央での電圧が最も低くなる結果が得られた。さらに(4)式の結果とシミュレーション結果とはほぼ一致している。

〈3・2〉3相水平配列線路 図6(a)に示す500kV3相水平配列線路の場合について検討する。ノードP1に次式に示す3相交流電源を接続する。

$$\left. \begin{aligned} I_u &= I_0 \cos(\omega t - 120^\circ) \\ I_v &= I_0 \cos(\omega t) \\ I_w &= I_0 \cos(\omega t + 120^\circ) \\ I_0 &= 1 \text{ kA}, f = 50 \text{ Hz} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ガスパイプラインは図1と同一とする。Cable Parametersの計算結果よりこの水平配列線路の自己サージインピーダンスは 380Ω となり、対応する多相整合抵抗を接続した。なおガスパイプライン接地抵抗 R_g は 10Ω とした。線路長は送電線とガスパイプラインの並行する区間 $x_1 = 1 \text{ km}$ 、ガスパイプラインのみの区間 $x_2 = 0$ である。また図6に示す y は水平配列線路中央の導体からガスパイプラインまでの水平離隔距離であり、例えばcase 11では $y = -100 \text{ m}$ としている。

表3(a)に水平配列線路からガスパイプラインへの交流誘導電圧シミュレーション結果を示す。表より、case 12とcase 16（水平離隔距離 $y = \pm 28 \text{ m}$ ）のとき交流誘導電圧が最大となる結果が得られた。また今回のケースでは $y = 0$ （送電線中相の直下）および $y = \pm 100 \text{ m}$ のとき、交流誘導電圧は最小となった。これは送電線を通る電流が対称3相交流電流であり、各相による磁束が打ち消しあうためと考えられる。さらに距離 y を無限長とすれば交流誘導電圧は0となる。

表3(a)の結果について近似式 $V_m = -Z_m I$ より解析的に

図6 線路構造
Fig. 6. Line configuration.

検討する。送電線各相のガスパイプラインに対する相互インピーダンスは次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} Z_{mu} &= 0.137 \angle 69.82^\circ \\ Z_{mv} &= 0.128 \angle 68.56^\circ \\ Z_{mw} &= 0.121 \angle 67.35^\circ \end{aligned} \right\} \text{ [}\Omega\text{/km]} \quad (6)$$

(5), (6)式から各相による誘導電圧は次の結果となる。

$$\left. \begin{aligned} V_{mu} &= 136.5 \angle 129.8^\circ \\ V_{mv} &= 128.0 \angle -111.4^\circ \\ V_{mw} &= 120.5 \angle 7.35^\circ \end{aligned} \right\} \text{ [V/km]} \quad (7)$$

ガスパイプラインの交流誘導電圧は上式のベクトル和として次のように与えられる。

表 3 多相線路でのシミュレーション結果

Table 3. Simulation results on a multiphase line.

(a) Three-phase horizontal line (case 1)

case	y [m]	$V_{G1}\angle\theta_1$ [V]	$V_{G2}\angle\theta_2$ [V]	$V_m\angle\theta_m$ [V]
11	-100.0	$7.29\angle-5.65^\circ$	$7.29\angle174.4^\circ$	$14.6\angle174.3^\circ$
12	-28.0	$18.5\angle-4.79^\circ$	$18.5\angle175.2^\circ$	$37.0\angle175.2^\circ$
13	-14.0	$16.3\angle5.95^\circ$	$16.3\angle-174.1^\circ$	$32.6\angle-174.1^\circ$
14	0.0	$7.09\angle88.2^\circ$	$7.09\angle-91.8^\circ$	$14.2\angle-91.8^\circ$
15	14.0	$16.3\angle170.2^\circ$	$16.3\angle-9.77^\circ$	$32.6\angle-9.79^\circ$
16	28.0	$18.4\angle-179.3^\circ$	$18.4\angle0.70^\circ$	$36.8\angle0.70^\circ$
17	100.0	$7.25\angle178.2^\circ$	$7.25\angle-1.77^\circ$	$14.5\angle-1.79^\circ$

(b) Three-phase vertical line (case 2)

case	y [m]	$V_{G1}\angle\theta_1$ [V]	$V_{G2}\angle\theta_2$ [V]	$V_m\angle\theta_m$ [V]
21	-100.0	$0.17\angle108.4^\circ$	$0.16\angle-53.7^\circ$	$0.33\angle-62.9^\circ$
22	-28.0	$2.37\angle-179.5^\circ$	$2.40\angle1.21^\circ$	$4.77\angle0.9^\circ$
23	-14.0	$5.05\angle179.0^\circ$	$5.74\angle3.59^\circ$	$10.7\angle1.4^\circ$
24	0.0	$8.59\angle174.4^\circ$	$9.47\angle5.32^\circ$	$17.9\angle0.1^\circ$
25	14.0	$5.05\angle179.0^\circ$	$5.74\angle3.59^\circ$	$10.7\angle1.4^\circ$
26	28.0	$2.37\angle-179.5^\circ$	$2.40\angle1.21^\circ$	$4.77\angle0.9^\circ$
27	100.0	$0.16\angle108.4^\circ$	$0.16\angle-53.7^\circ$	$0.32\angle-62.7^\circ$

(c) Vertical twin-circuit line (case 3)

case	y [m]	$V_{G1}\angle\theta_1$ [V]	$V_{G2}\angle\theta_2$ [V]	$V_m\angle\theta_m$ [V]
31	-100.0	$1.52\angle-158.1^\circ$	$1.29\angle-155.8^\circ$	$0.24\angle9.3^\circ$
32	-28.0	$4.18\angle-176.2^\circ$	$4.22\angle3.95^\circ$	$8.40\angle3.9^\circ$
33	-14.0	$5.90\angle-175.4^\circ$	$7.30\angle-2.55^\circ$	$13.1\angle0.6^\circ$
34	0.0	$3.16\angle116.1^\circ$	$3.07\angle118.6^\circ$	$0.16\angle-119.1^\circ$
35	14.0	$6.67\angle6.37^\circ$	$6.55\angle-171.4^\circ$	$13.2\angle-172.5^\circ$
36	28.0	$4.28\angle3.59^\circ$	$4.18\angle-175.3^\circ$	$8.46\angle-175.9^\circ$
37	100.0	$1.41\angle13.8^\circ$	$1.17\angle21.2^\circ$	$0.29\angle162.7^\circ$

$$V_m = V_{mu} + V_{mv} + V_{mw} \\ = 14.6\angle175.5^\circ \quad [\text{V/km}] \quad \dots\dots\dots (8)$$

上記計算結果は表 3(a) のケース 11 とよく一致している。また V_{mi} と V_m を比較することで 3 相架空電力線による磁束はベクトルの和となるため、交流誘導電圧は単相電力線よりも 3 相電力線の方が小となることが説明できる。

〈3・3〉 3 相垂直配列線路 表 3 (b) に 3 相垂直配列線路 case 21–27 のシミュレーション結果を示す。表より垂直配列線路での交流誘導電圧は水平配列線路の半分以下となることがわかる。また送電線直下 ($y = 0$) での交流誘導電圧が最大となった。この現象は 3 相送電線の垂直配列構造によるものであり、相互インピーダンスから容易に説明できる。例えば、ガスパイプラインと送電線の離隔距離が $y = -100$ [m] の場合、

$$\left. \begin{aligned} Z_{mu} &= 0.128\angle68.61^\circ \\ Z_{mv} &= 0.128\angle68.55^\circ \\ Z_{mw} &= 0.128\angle68.48^\circ \quad [\Omega/\text{km}] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

(5) 式と上式より次の交流誘導電圧が解析的に得られる。

$$\left. \begin{aligned} V_{mu} &= 127.8\angle128.6^\circ \\ V_{mv} &= 128.0\angle-111.5^\circ \\ V_{mw} &= 128.1\angle8.48^\circ \\ V_m &= 0.38\angle-68.7^\circ \quad [\text{V/km}] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

この解析計算結果は表 3(b) のケース 21 のシミュレーション結果とよく一致している。

〈3・4〉 3 相 2 回線 表 3(c) に case 31–37 (3 相 2 回線線路) のシミュレーション結果を示す。この場合、各相電流は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} I_u &= I_{u'} = I_0 \cos(\omega t - 120^\circ) \\ I_v &= I_{v'} = I_0 \cos(\omega t) \\ I_w &= I_{w'} = I_0 \cos(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

500 kV 送電線は通常逆相配列となっているため、交流誘導電圧は 3 相 1 回線のケースよりも小となり、かつ、 $y = 0$ のとき最小となる。

参考迄に $y = -28$ m (case 32) の時の相互インピーダンスと交流誘導電圧の解析計算結果を次に示す。

$$\left. \begin{aligned} Z_{mu} &= 0.212\angle76.94^\circ \\ Z_{mv} &= 0.218\angle77.25^\circ \\ Z_{mw} &= 0.225\angle77.55^\circ \\ Z_{mu'} &= 0.174\angle74.11^\circ \\ Z_{mv'} &= 0.176\angle74.17^\circ \\ Z_{mw'} &= 0.177\angle74.22^\circ \quad [\Omega/\text{km}] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

$$\left. \begin{aligned} V_{mu} &= 212.3\angle136.9^\circ \\ V_{mv} &= 218.3\angle-102.8^\circ \\ V_{mw} &= 224.6\angle17.6^\circ \\ V_{mu'} &= 174.2\angle14.1^\circ \\ V_{mv'} &= 175.7\angle-105.8^\circ \\ V_{mw'} &= 177.0\angle134.2^\circ \\ V_m &= 8.51\angle0.074^\circ \quad [\text{V/km}] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

4. 実系統でのシミュレーション

実系統を模擬したモデル系統での誘導電圧シミュレーションを行う。図 7 に系統構成を示す。

ガスパイプ構造は図 1 と同じである。ガスパイプラインは GP00~GP13 の 13 区間からなり、その一部は送電線と並行している。図中 A は 66 kV、B は 500 kV 送電線である。ノード GP02~GP10 の区間は 500 kV 送電線と並行している区間とし、GP11~GP12 は 66 kV 送電線と並行している区間とみなす。

送電線は 3 相非撚架垂直配列 2 回線であり、その線路定数を表 4 に示す。なお、線路構造は図 6(c) と同様である。架空電力線とガスパイプラインが斜行しているときには、始端での離隔距離 y_i 、終端での離隔距離 y_j として、

$$y \approx \sqrt{y_i \cdot y_j} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ただし $y_i = 0$ のときには $y \approx 4.68 \sqrt{y_j}$

で与えられる離隔距離 y を用いる⁽¹²⁾。各ノードでの離隔距離を表 5 に示す。

電流源は (11) 式と同じである。ただし振幅 I_0 は電力会社のデータに従い 66 kV では 120 [A]、500 kV では 1000 [A]

図 7 システム構成

Fig. 7. System configuration.

とした。また架空地線の始端及び終端は接地とした。誘導電圧に対するガスパイプライン接地の影響を検討するために、ガスパイプ両端のみを 10 [Ω] で接地する場合 (case 0) と、ガスパイプ各ノードを 10 [Ω] で接地する場合 (case 1) のシミュレーションを分布定数線路モデルを用いて行った。

シミュレーション結果を図 8 に示す。図より全てのノードにおいて接地数の多い case 1 の方がガスパイプ交流誘導電圧が小となる結果となった。また case 0, 1 共にガスパイプの電圧は両端に近いノードが大となり、中央部の電圧は小となる傾向が得られた。この電圧分布の特性は 3・1 節で検討した単相線路の結果と同じである。図 8 においてもノード GP06~GP09 では送電線とガスパイプの離隔距離が小にもかかわらず、交流誘導電圧は小となっている。しかし case 0 においてはノード GP09 と GP10 の電位差が最大となっており、ガスパイプと送電線が最も接近していることが原因と考えられる。ノード GP09-GP10 間での送電線 u 相とガ

スパイクの相互インピーダンスは $46.4 + j135.09$ [mΩ/km] であり、他のノード間の相互インピーダンスに比べて大であることからノード GP09-GP10 間の電位差が大となると推測される。一方、case 1 の場合ノード GP09-GP10 間の電位差は case 0 に比べて小となっているものの、ノード GP10-GP11 間の電位差は case 0 に比べて大となった。また GP11-GP12 間ではガスパイプと 66 kV 送電線の相互インピーダンスは大きくないものの線路長が長い為、結果としてノード GP10 に影響を与えていると考えられる。

以上のシミュレーションでは大地抵抗率 $\rho_e = 50$ [Ωm] 一定としたが、大地抵抗率を $\rho_e = 20, 50, 100$ [Ωm] と変化した場合のシミュレーション結果を図 9 に示す。図よりノード GP10 を除いて大地抵抗率 ρ_e が大となるにつれてガスパイプライン交流誘導電圧も大となることが知られる。

したがってガスパイプライン交流誘導電圧は湿地等の大地抵抗率が小となる場所では大地の影響により減少するが、

表 4 線路定数

Table 4. Line parameters.

system voltage [kV]	66	500
height h_g [m]	27	39
h_3	23	31
h_2	19	23
h_1	15	15
distance d [m]	5	7
phase conductor		
bundle number	1	4
separations [m]	—	0.4
inner radius r_{pi} [mm]	5.7	1.974
outer radius r_{po} [mm]	17.1	8.74
dc resistance R_{dcp} [Ω /km]	0.0474	0.0415
ground wire		
bundle number	1	2
radius r_g [mm]	5.25	6.18
dc resistance R_{dcg} [Ω /km]	1.270	0.4467

Line configuration: same as Fig. 6(c)

表 5 送電線-ガスパイプライン間隔

Table 5. Separation between transmission and gas-pipe lines.

send.	rec.	y_i [m]	y_j [m]	y [m]
GP02	GP03	800	800	800
GP03	GP04	800	400	566
GP04	GP05	400	600	490
GP05	GP06	500	0	105
GP06	GP07	500	300	387
GP07	GP08	300	600	424
GP08	GP09	600	200	346
GP09	GP10	200	0	66
GP11	GP12	1300	700	954

図 8 シミュレーション結果

Fig. 8. Simulation results.

乾燥地等の大地抵抗率が大となる場所では交流誘導電圧も大となるため、接地数を増やすなどの対策が必要となると考えられる。

さて、図 7 に対応する実系統でのガスパイプラインの対地電圧測定結果は 1.17~2.48 [V] の範囲にあり、実測系の線路構造、電流および大地抵抗率等が明瞭ではなかったことを考慮すると、図 8、図 9 のシミュレーション結果は

図 9 大地抵抗率の影響

Fig. 9. Effect of earth resistivity.

測定結果にほぼ対応していると言える。

5. 結 言

本論文では、架空電力線から地中埋設ガスパイプラインへの交流誘導電圧のシミュレーション手法を確立し、これによる EMTP シミュレーション結果は周知の電磁誘導理論解と良好に一致すること、また、実系統での測定結果を概略再現できることを示した。このシミュレーション手法を用いて電力線構造の影響について検討し、以下の事項を明らかにした。

(1) ガスパイプラインへの交流誘導電圧は電力線を単相とした場合に最大となる。これは電力線から電話線への電磁誘導と同じであり、単相模擬は電力線の地絡事故時に対応している。

(2) 3 相線路の場合、ガスパイプラインへの誘導電圧は線路構造および回線数に大きく依存する。誘導電圧は 3 相水平配列線路の場合もっとも大となり、垂直配列線路の 2 倍程度である。垂直配列の場合、2 回線では 1 回線に対して約 20% 程度小となる。当然のことながら交流誘導電圧はガスパイプラインと架空電力線の離隔距離に依存する。

(3) 実系統を模擬したシミュレーションではガスパイプラインをいくつかの区間に分割し、これらを組み合わせることでガスパイプライン交流誘導電圧シミュレーションが可能である。

(平成 17 年 4 月 11 日受付, 平成 17 年 7 月 25 日再受付)

文 献

- (1) Handbook of Corrosions and the Countermeasures, Maruzen (2000) (in Japanese)
腐食・防食ハンドブック, 丸善 出版事業部 (2000)
- (2) A. Ametani, J. Kamba, and Y. Hosokawa: "A simulation method of voltages and currents on a gas pipeline and its fault location", *IEEE Trans. PE*, Vol.B-123, No.10, pp.1194-1200 (2003-10) (in Japanese)
雨谷昭弘・神波淳介・細川裕司:「ガスパイプラインの電圧・電流シミュレーション手法と事故評定」, *電学論 B*, **123**, 10, pp.1194-1200 (2003-10)
- (3) W. Scott-Meyer: ATP Rule Book, Bonneville Power Administration (1994)
- (4) A. Ametani: Cable Parameters Rule Book, B.P.A. (1996-4)
- (5) F. Pollaczek: Über das Feld einer unendlich langen wechselstromdurchflossenen Einfachleitung, *E.N.T.*, Band 3 (Heft9), pp.339-360 (1926)

- (6) A. Ametani, S. Yamaguchi, and N. Nagaoka: "Mutual Impedance between Overhead and Underground Cables", *EMTP J.*, Vol.4, pp.84-91 (1999)
- (7) H. Isogai, A. Ametani, and Y. Hosokawa: "A simulation method of an ac induced voltage on a buried gas pipeline from an overhead line", 2004 National Convention Record, IEE Japan, No.6-118 (2004-3) (in Japanese)
磯貝 浩・雨谷昭弘・細川裕司:「架空線から地中ガスパイプへの交流誘導電圧シミュレーション手法」, 平成 16 年電気学会全国大会, No.6-118 (2004-3)
- (8) H. Isogai, A. Ametani, and Y. Hosokawa: "Basic Investigation of Induced Voltages to a Buried Gas Pipeline from an Overhead Transmission Line", *ICEE'04 Conference Proceedings*, Vol.2, pp.361-365 (2004-7)
- (9) A. Ametani: *Distributed-Parameter Circuit Theory*, Corona Pub. Co. (1990) (in Japanese)
雨谷昭弘: 分布定数回路論, コロナ社 (1990)
- (10) A. Ametani, M. Aoki, and T. Imamura: "Basic investigation of transient voltage and current to a communication wire from an overhead transmission line", *T. IEE Japan*, Vol.B-109, No.4, pp.153-160 (1989-4) (in Japanese)
雨谷昭弘・青木眞弓・今村隆司:「架空送電線から通信線への過渡誘導電圧・電流の基礎的研究」, 電学論 B, **109**, 4, pp.153-160 (1989-4)
- (11) T. Koike: *Transmission and Distribution Engineering*, Cap.9.5, Yokendo Pub. Co. (1995) (in Japanese)
小池東一郎: 送配電工学 (前編), 9.5 節, 養賢堂 (1995)
- (12) A. Ametani, K. Kaneko, and H. Tsujimura: *Electric Energy Sysytem Engineering*, Cap.2.6, Nikkan-Kogyo Press (1988) (in Japanese)
雨谷昭弘・金子和博・辻村 寛: 電気エネルギーシステム工学, 2.6 節, 日刊工業新聞社 (1988)

磯 貝 浩 (学生員) 1980 年 9 月 25 日生。2003 年 3 月同志社大学工学部電気工学科卒業。2005 年同大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月東京電力 (株) 入社, 現在に至る。

雨 谷 昭 弘 (正員) 1944 年 2 月 14 日生。1968 年 3 月同志社大学大学院電気工学専攻修士課程修了。1973 年マンチェスター大学院博士課程修了, Ph.D.。1976 年から 1981 年米国エネルギー省にて EMTP の開発に従事。1985 年同志社大学教授。1988 年 Leuven 大学教授兼任。1996~1997 年同志社大学理工学研究所所長。1998~2001 年同大学学術情報センター所長。2003~2004 年電気学会理事副会長。分布定数回路, 過渡現象, 高調波, 数値解析法の開発に従事。1976 年電気学会論文賞。1996 年照明学会論文賞。英国技術士。CIGRE 特別会員。IEE および IEEE フェロー。

細 川 裕 司 (非会員) 1971 年 3 月 28 日生。1995 年 3 月東京大学大学院工学研究科修士課程修了。同 4 月東京ガス (株) 入社。2004 年 4 月工学博士 (東京大学)。ガスパイプラインの電気防食, 塗覆装損傷検知等の開発・研究に従事。