GIS 地下変電所における接地系の過渡応答特性

正員 岡部 成光 (東京電力) 正員 山田 実智雄 (東京電力)
 正員 野嶋 健一 (東芝) 正員 鈴木 克巳 (東芝)

Transient Response of Grounding System in Underground GIS Substation

Shigemitsu Okabe, Member, Michio Yamada, Member (Tokyo Electric Power Company)
 Kenichi Nojima, Member, Katsumi Suzuki, Member (Toshiba Corporation)

Transient grounding impedance of a gas-insulated switchgear (GIS) substation were investigated through measurements on a commercial 300kV underground substation. From the results, the transient impedance of the grounding grid was clarified. The attenuation factor of the propagation line composed of the outer surface of the GIS tank and the concrete floor was also evaluated. Furthermore, the validity of EMTP analysis on the surge phenomena in the GIS grounding system was confirmed.

キーワード: GIS, 接地メッシュ, 地下変電所, 過渡インピーダンス
 Keywords: GIS, grounding grid, underground substation, transient impedance

1. まえがき

大都市部の電力需要の増加へ対応するため、地下変電所への高電圧ガス絶縁開閉装置 (GIS) の適用が進んでいる。300kVGIS 地下変電所はすでに多数運転されており、初の 500kVGIS 地下変電所も実用化された。このような GIS 地下変電所は、容量の大きさだけでなく需要先に近接していることから一層の信頼性の向上が求められており、保護・制御系を含めた変電所全体の信頼性の向上が一層重要になっている。

一方、近年、送変電機器の保護・制御機器にエレクトロニクス装置が多く用いられるようになり、これらの装置への電磁誘導障害が注目されるようになってきた。特に、開閉装置の様な高電圧機器と保護・制御機器が近接して設置されることの多い GIS 地下変電所においては、開閉装置を動作させた時に発生する高周波サージに起因した誘導障害 (EMI) に注意する必要がある。それゆえ、接地電位の過渡的な振動やタンク電位の振動を考える上で重要な、接地メッシュやタンクの過渡インピーダンスを把握して置くことが重要である。しかしながら、実変電所の接地系においてこれらを実測したり、その解析法を検討した報告^{(1),(2),(3)}は少なかった。

本報告では、実 300kV 地下変電所において接地メッシュとタンクの過渡インピーダンスについて実測し検討した結果を述べる。

2. GIS 接地系へのサージ漏洩

GIS の開閉装置を動作させると、GIS タンクの内部に立ち上がり時間が数 ns の急峻なステップ波電圧が発生する⁽⁴⁾。この急峻波電圧は GIS の高電圧導体とタンク内面から構成される伝搬線路に沿って往復伝搬し、複雑な波形をもつ高周波サージ電圧を発生させる。

更に GIS タンクに絶縁フランジやケーブルヘッド部のような絶縁区分が存在すると、GIS タンク内部に生じた高周波サージが接地系にも漏洩し伝搬する。この現象を模式的に表し、電気回路のモデル化をすると図 1⁽⁵⁾のようになる。即ち、中心導体に高周波サージが流れインピーダンス不連続点において、タンクー対地間のサージインピーダンスや接地線に高周波電流が流れるという言い方もできる。

このように GIS タンク内部から漏洩したサージは、近接機器に影響を及ぼす主要な経路として、接地導体ー接地メッシュの様な金属導体に沿った伝搬と、対地上面 (現実的にはコンクリートなど) を回路要素とする線路に沿う伝搬の 2 種類が考えられる。

以下では、漏洩サージの影響が近接機器に至ると考えられるこれら 2 つの経路に関して、接地メッシュの急峻波電圧に対する過渡応答と GIS タンク外面の急峻波伝搬特性について 300kV 地下変電所の実接地系を用いて実測検討した。

3. 接地メッシュの急峻波過渡応答

〈3.1〉 接地メッシュの構造 地下変電所の接地メッシュへ急峻波サージが流入したときのメッシュの過渡応答特性を、300kV 実 GIS 地下変電所のメッシュを用いて実測した。地下4階に布設されたメッシュを用いた。メッシュの構造を図2に示す。接地メッシュは、6m×6mの主メッシュ(断面積 100mm²)と 6.4m×9.6m (一部 2m×3m)の補助メッシュ(断面積 100mm²)とからなる2層構造である。主メッシュはコンクリート床面の下 3.5m に埋設されている。補助メッシュは地表面から 500mm 下のコンクリート中に布設されている。

〈3.2〉 測定方法 図3(a), (b)に試験回路の概念図を示す⁽⁶⁾。図3(a)中の充電したコンデンサ C1の片端を接地メッシュへ短絡させて接地メッシュへ急峻波電流を流入させる。図3(b)に示す測定回路を用いてメッシュの過渡電位を測定し、過渡抵抗を算出する。補助接地線は、測定時間内の接地端からの反射波がなるべく遅くなるよう 20m 程度に長くした。これにより、接地メッシュの過渡応答を(2×20m)/(3×10⁸m/s)~130ns まで反射波の無い状態で観測することができる。更に接地端には整合抵抗 300Ω (補助接地線の高さ h=300mm, 補助線半径 r=3mm より, 補助線のインピーダンス $Z=60\ln(2h/r)=318\Omega$ …鉄塔インピーダンス測定時などより低いことに注意)を設け、反射の影響を軽減している。後載の図5の電圧・電流波形において 130ns 前後で大きな不連続が見えないことから、整合抵抗が有効に機能していると考えられる。

図4に補助メッシュの配置と対応させて電流注入点および測定点を示す。測定は表1に示す3ケースについて行った。CASE1においては、図4の①点へ電流を流入させ、注入電流と①~⑦のいずれかの点の電位を同時に測定した。CASE2においては、⑧の点へ電流を流入させて、流入電流波形と電流流入点の電位を同時に測定した。CASE3においても、⑨の点において、流入電流波形と流入点の電位を同時に測定した。なお、負荷に純抵抗あるいは分布定数で近似可能な系の場合、流入電流の立ち上がりは 2ns 程度になる。流入電流は、高周波 CT を用いて検出した。CT の出力は光信号に変換して伝送し、再び電気信号に変換してからデジタルオシロスコープ(サンプリング周波数: 2GHz)を用いて測定した。電位の検出信号も同様に光信号に変換して伝送して測定した。測定系全体での測定可能な立ち上がり時間は 2.5ns 程度である。

測定装置の基本仕様を表2にまとめる。

表1 測定条件
Table 1 Measurement condition

	電流注入点	電位側定点
CASE1	①	①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥, ⑦
CASE2	⑧	⑧
CASE3	⑨	⑨

※ 表中の番号は図4の番号に対応する。

(a) GISモデル

(b) GISモデルの等価回路

図1 電界分布の解析例
Fig.1 Example of analyzed electric field distribution

図2 接地メッシュの構造
Fig.2 Structure of grounding grid

図3 実験回路
Fig.3 Experimental circuit

〈3.3〉 測定結果 CASE1 の電位測定点①について、注入電流およびメッシュ電位の実測波形例を図5に示す。前述のように電源の立ち上がりは2ns程度であるが、図5の流入電流波形は立ち上がり時間が150ns程度になっている。これは今回の負荷が後述のように、インダクタンス成分が大きいことによるものである。また、流入電流波形にも発生電圧波形にも30MHz程度の振動が重畳しているが、この30MHz程度の振動成分の大きさは、電流注入点を変えると変化した。CASE1における実測電圧波形 V_g を周波数 f についてフーリエ変換した $V(f)$ と電流波形 I_g をフーリエ変換した $I(f)$ とから、インピーダンスの周波数特性 $Z(f) = V(f)/I(f)$ を算出した。CTの周波数特性の公称値を参照し、20MHzまでの周波数についてインピーダンスを算出した。結果を図6に示す。インピーダンス $Z(f)$ は5MHz～20MHzの周波数領域で周波数にほぼ比例している。これは、この周波数領域では、メッシュのインピーダンスはインダクタンス成分が支配的であることを示している。

このインダクタンスの値は、図6の直線の傾きとして評価でき、0.5MHzおきのデータから最小二乗法で回帰直線を求めた。CASE1においてはインダクタンスの値は0.22 μ Hであった。他のCASEの電流注入点についても、インピーダンスはやはりインダクタンス成分が支配的であった。各電流注入点についての注入電流波形および注入点の過渡電位波形から同様に算出したインダクタンスの値をまとめて表3に示す。測定点によらず等価インダクタンスの値は0.21 μ H～0.22 μ Hであることが分かった。

表1に示した様に、CASE1においては電流注入点近傍のメッシュの電位も測定した。図7に各測定点での発生電圧のピーク値を示す。発生電圧は注入点からの距離に従って急激に減少し、4m程度の距離で電流流入点の10%程度にまで減少した。メッシュ電位の主な変動範囲はこの程度の範囲であると考えられる。

表2 測定装置
Table2 Measuring equipment

測定項目	メーカー名・形式	装置仕様
電流	ピアソン社 CT2100	周波数帯域: 125Hz～20MHz 感度: 1V/A(1M Ω), 0.5V/A(50 Ω)
電圧	テクトロニクス社 6009	周波数帯域: DC～120MHz 入力インピーダンス: 10M Ω , 2.5pF
オシロスコープ	テクトロニクス社 TDS784D	周波数帯域: DC～1GHz サンプリング速度: 最大4GS/s 分解能: 8bit/word
伝送系	ソニーテクトロニクス社 6906AS	周波数帯域: DC～100MHz 入力感度: ± 1 V

表3 各測定点の等価インダクタンス成分
Table 3 Equivalent inductance

CASE番号	1	2	3
インダクタンス値(μ H)	0.22	0.21	0.22

図4 電流注入点と電位測定点
Fig.4 Points for current injection and potential measurements

図5 測定波形例
Fig.5 Example of measured waveform

図6 接地インピーダンスの周波数特性
Fig.6 Frequency characteristics of grounding impedance

図7 メッシュ電位分布
Fig.7 Mesh potential distribution

図 8 モデルの構成
Fig.8 Structure of model

4. GIS タンク外面伝搬特性

〈4.1〉 測定方法 GIS タンク外面に沿った伝搬路の伝搬特性を実 300kV 地下変電所の GIS 布設予定の床面を使って実測した。床面はコンクリートである。

測定のために縮小モデル GIS 母線をこの地下変電所へ持ち込んだ。図 8 にモデル GIS 母線の構成を示す。中心導体の外径 60mm、タンクの内径 210mm の単相縮小モデル GIS 母線である。モデル GIS 母線の全長は 15.8m であり、中心の床面からの高さが 300mm となるように水平に配置した。この場合、タンク内部の線路の特性インピーダンスは 75Ω、タンク外面と床面との間の特性インピーダンスは 101Ω と見積もられる。この GIS 母線のタンクには絶縁区分部を設けおり、絶縁区分部から 2.3m の点 P と 8.9m の点 Q の同軸線路を円錐型線路としてタンク径を縮小し、タンク電流測定用の高周波 CT を取り付けられる様にした。電圧印加はモデル GIS 母線の端部に取り付けた円錐状の線路から中心導体とタンク内面との間にステップ波電圧 e_0 を注入した。

測定装置の基本仕様は表 4 にまとめる。

表 4 測定装置
Table4 Measuring equipment

測定項目	メーカー名・形式	装置仕様
電 流	ピアソン社 CT4100	周波数帯域：140Hz～35MHz 感度：1 V/A(1MΩ), 0.5V/A(50Ω)
電 圧	テクトロニクス社 P6205	周波数帯域：DC～740MHz 入力インピーダンス：1MΩ, 2pF
パルス発生 スイッチ	水銀スイッチ	スイッチング時間：2.5ns 以下
オシロ スコープ	テクトロニクス社 TDS784D	周波数帯域：DC～1GHz サンプリング速度：最大 4GS/s 分解能：8bit/word

この構成の絶縁区分部の等価回路を図 9 に示す。分布定

数回路理論に従うと、A 点のタンク外面の電圧 V_4 およびタンクに流れる全電流 I_4 は次式にて表される。

$$V_4 = 2Z_4e_0 / (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4) \quad (1)$$

$$I_4 = V_4 / Z_4 \quad (2)$$

点 P と点 Q の電流波形を測定し、距離による周波数成分の変化を測定した。比較のため、接地面に銅板を敷き詰めた場合についても測定した。

〈4.2〉 測定結果 立ち上がり時間が 2.5ns で大きさ 14V のステップ波を中心導体とタンク内面との間に印加した。接地面に銅板を布設した状態で測定した絶縁区分部から 2.3m の点でのタンク電流の測定結果を図 10 に示す。印加電圧と同程度の立ち上がり時間の電流が観測されている。TEM 波を前提とした分布定数回路理論によると、タンク電位は $14V \times (2 \times 101\Omega) / (75\Omega + 101\Omega + 75\Omega + 101\Omega) = 8V$ であり、タンク外面電流は $8V/101\Omega \sim 80mA$ となることが予想される。実測された電流波形の初期部の電流値はこれと一致していない。原因の一つとして、絶縁ブランジ部を通してタンク内部から外部の接地系へ高周波サージが漏洩する際の TEM モードの変歪が考えられるが、詳細は今のところ不明である。タンク外面電流値は 20ns 程度で理論値に近づいている。この程度の時間が過ぎると、タンク外面に沿った伝搬波は TEM 波とみなせるようになり、分布定数回路で取り扱えるものと考えられる。絶縁区分部から 8.9m 離れた測定点 Q でのタンク外面電流の立ち上がり時間も P 点のそれと同程度であった。

接地面の銅板を取り除き、接地面をコンクリートとした場合の、測定点 Q のタンク外面電流を図 11 に示す。立ち上がり時間が 7.5ns 程度に長くなっていることが分かる。

これらの結果から、コンクリート上のタンク外面に沿った伝搬回路の減衰は、銅板布設の場合よりも大きいものと考えられる。また、立ち上がり時間が 20ns 程度よりも遅い波形について検討する場合には、分布定数回路を用いて検討できるものと考えられる。

図 9 絶縁区分部の等価回路

Fig.9 Equivalent circuit around insulated joint

縦軸 : 50mA/div
横軸 : 6.25ns/div

図 10 タンク電流波形 (測定点 P)

Fig. 10 Tank current waveform (Measured at point P)

縦軸 : 50mA/div
横軸 : 6.25ns/div

図 11 タンク電流波形 (測定点 Q)

Fig.11 Tank current waveform (Measured at point Q)

5. 検 討

〈5.1〉 接地メッシュの過渡応答 接地メッシュの過渡応答を検討するための等価回路を得るため、EMTP 解析 (ATP/Salford バージョンを使用) を実施した。図 7 にも示した様に急峻波電流に対する応答に寄与するメッシュの広がり是比较的狭いことが知られているので、ここでは補助メッシュを対象として図 12 に示したような π 型等価回路を作成した。メッシュ導体はコンクリート内に布設された円筒導体で模擬した。導体の大地帰路インピーダンスおよび相互インピーダンスの算出には Wedephole の式⁽⁷⁾を用いた。導体の漏れ抵抗は Sunde の式⁽⁸⁾から算出した。コンクリートの体積抵抗率は $20 \Omega \text{m}$ 均一と仮定し、Wedephole 式の精度が比較的良好とされている上限周波数 1MHz に対する値を算出した。導体は 1m 長さに分割した。

図 4 の①の点へ電流を流入させた場合の電流流入点の電位の解析例を図 13(a), (b)に示す。発生電圧レベルは図 5 の実測結果とほぼ同程度の結果を得られている。しかし、波形全体の減衰時間が実測結果よりも長くなっており、また基本波形に重畳した振動の減衰が早くなっている。波形のピーク値は主にインダクタンス成分によって決まるが、

基本波形や重畳振動の減衰時間は漏れ抵抗の影響を受けやすい。今回の解析では、漏れ抵抗値は固定値としているが、実際には周波数が小さくなると減少することが知られており、今回の測定でも時間の経過と共に減少しているものと考えられる。漏れ抵抗の減少は基本波形の減衰時間を早くし、重畳振動の減衰を小さくする効果を持つことから、漏れ抵抗を一定値として用いていることが減衰時間の誤差の主因として考えられる。発生電圧波形の減衰時間に誤差は見られるものの、解析で得られる電位上昇レベルは実測結果とほぼ一致しており、図 12 の回路は電位上昇レベルを検討するのに有用であると考えられる。

〈5.2〉 タンク外表面伝搬サージの減衰 図 8 の測定点 P での電流 $I_{2.3}$ および Q で実測した電流 $I_{8.9}$ を用いて、タンク外面を $8.9\text{m} - 2.3\text{m} = 6.6\text{m}$ 伝搬したサージの周波数成分の減衰率 (振幅比) を算出した。まず、 $I_{2.3}$ の周波数スペクトル ($I_{2.3}(f)$) と $I_{8.9}$ の周波数スペクトル ($I_{8.9}(f)$) とを実測波形から FFT 解析した。その結果を用いて、 $I_{8.9}$ の各周波数成分の $I_{2.3}$ の各周波数成分に対する減衰率 ($I_{8.9}(f)/I_{2.3}(f)$) を算出した。結果を図 14 に示す。図 14 には、コンクリートの体積抵抗率が $20 \Omega \text{m}$ と $100 \Omega \text{m}$ の場合について EMTP の CABLE CONSTANTS (ケーブル / 架空線定数計算ルーチン) から得られる減衰定数⁽⁹⁾を用いて算出した減衰率も示す。図 14 から、コンクリート床面上のタンクに沿った減衰率の実測結果は、 35MHz 以下の周波数領域において CABLE CONSTANTS を基に算出された減衰率とほぼ同レベルであることがわかる。この結果から、タンク外面に沿ったサージの伝搬現象はコンクリートの体積抵抗率を数 $10 \sim 100 \Omega \text{m}$ として CABLE CONSTANTS から求めた回路定数を用いて検討できると考えられる。

R_w : 抵抗成分
 L_w : 自己インダクタンス
 M_w : 相互インダクタンス
 C_w : キャパシタンス

図 12 メッシュの等価回路 (補助メッシュ)

Fig.12 Equivalent circuit of grid

文 献

- (1) 電気学会技術報告, 「ガス絶縁開閉装置における低圧側への誘導現象」, 第 273 号, II 部, 1988
- (2) N.Fujimoto et al., "Transient Ground Potential Rise in Gas Insulated Substation-Experimental Studies", IEEE, 82 WM011-5, 1982
- (3) 山形ほか, 「1000KV GIS における高周波サージの接地系伝搬特性」, 平成 9 年電気学会 B 部門大会 599
- (4) S.Yanabu, H.Murase, H.Aoyagi, H.Okubo, Y.Kawaguchi, "Estimation of Fast Transient Overvoltage in Gas-insulated Substation", IEEE Trans., PWRD, Vol.5, No.4, p.p.1875-1822, 1990
- (5) 小沢ほか, 「GIS における低圧側への誘導サージ」, 電気学会開閉保護装置研究会資料, SPD-28-20, 1985
- (6) S. Karaki, T.Yamazaki, K.Nojima, T.Yokota, H.Murase, H.Takahashi, S. Kojima, "Transient Impedance of GIS Grouding Grid", IEEE Trans, PWRD, Vol.10, No.2, p.p.723-731, 1995
- (7) L.M.Wedepole, "Transient analysis of underground power-transmission systems", Proc. IEE, Vol.120, No.2, p.p.253-260, 1973
- (8) E.D.Sunde, "Surge Characteristics of a Buried Bare Wire", AIEE transactions, Vol.59, p.p.987-991, 1940
- (9) H.W.Dommel, S.Bhattacharya, V.Brandwajn, H.K.Lauw, L.Marti, "Electromagnetic Transients Program Reference Manual", B.P.A., U.S.A., August 1986

岡部 成光

(正員) 1986 年 3 月東京大学大学院博士課程修了。同年 4 月, 東京電力(株)入社。1992 年ミュンヘン工科大学客員研究員。現在, 電力技術研究所 雷・絶縁解析グループマネージャー。工学博士。IEEE 会員。

山田 実智雄

(正員) 1993 年 3 月横浜国立大学大学院修士課程修了。同年 4 月東京電力(株)入社。電力技術研究所勤務時に, 主として, 変電所機器の診断技術の研究に従事。現在, 神奈川支店平塚工務所勤務。

野嶋 健一

(正員) 1982 年 3 月大阪大学大学院修士課程修了。同年 4 月(株)東芝入社。現在電力・産業システム技術開発センターにて送変電機器の絶縁技術開発業務に従事。工学博士。IEEE 会員。

鈴木 克巳

(正員) 1978 年 3 月東京電機大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月(株)東芝入社。以来, 送変電機器の開発および放電現象の研究に従事。現在, 電力・産業システム技術開発センター送変電技術部長。IEEE 会員。

図 13 解析波形

Fig.13 Analyzed waveform

図 14 タンク外面に沿った伝搬路の減衰

Fig.14 Attenuation rate along tank outer surface line

6. 結 論

本論文では, 接地メッシュの急峻波電圧に対する過渡応答と GIS タンク外面の急峻波伝搬特性について, 300kV 地下 GIS 変電所にて実際の接地系を用いて測定し解析した結果, 以下の知見を得た。

- (1) 今回測定した接地メッシュの過渡インピーダンスの主成分はインダクタンス成分であり, おおよそ $0.2 \mu\text{H}$ である。
- (2) 接地メッシュ電位の上昇レベルは, コンクリートの体積抵抗率を用いて算出した回路定数を用いて構成した π 型等価回路を用いて検討できる。
- (3) 接地メッシュの電位上昇は電流流入点からの距離 4 m 程度で 10% に減衰する。
- (4) コンクリート床面上に配置した GIS タンクに沿ったサージの伝搬現象は, コンクリートの体積抵抗率を数 $10 \sim 100 \Omega\text{m}$ の媒質として CABLE CONSTANTS から算出される回路定数を用いて検討できる。

(平成 13 年 10 月 1 日受付, 平成 14 年 4 月 4 日再受付)