UDC 621.316.992.014.6 : 621.311.4.027.85.048.83

論文

59-B12

500kV ガス絶縁変電所における 接地線電流の実測と計算

正員	高見俊一	(関西電力)
正員	伊井庵	(関西電力)
正員	山本正則	(関西電力)
正員	小倉新三	(三菱電機)
正員	足立敏治	(三菱電機)
正員	高塚桂三	(三菱電機)

1. ま え が き

変電所の機器は、地絡電流、雷撃電流の流入による人身および機器の事故防止のため、変電所基礎内の接地メッシュに接続し、接地を行なっている。この接地メッシュと機器とが、接地線により閉回路を構成している場合、主回路電流により接地線に常時誘導電流(接地線電流)が流れる。特にガス絶縁変電所(Gas Insulated Substation 以下 GIS と略す)においては、主回路が接地電位であるタンクに収納されているため、タンクと接地線などを含む閉回路と主回路との磁気的結合が従来機器に比べ強く、接地線電流が多く流れる場合がある。

一方、近年の系統容量は増加の一途をたどり、接地線電流もそれに応じて増加することが考えられる。従って、接地線電流を正確に把握することは、接地線のサイズ、施工配置を設計するうえで大いに有効となる。

これに対し筆者らは架台、接地線などをインピーダンスに置き換え、電気回路網により接地線電流を求める実用的な計算法について検討を行ない、既に一部報

告⁽¹⁾⁽²⁾している。しかし、筆者らの知るかぎりでは接地線電流に関して詳細な報告をしている論文はなく、簡単な紹介として、Carson-Pollaczek のインピーダンス式を用いた計算と解析の報告⁽³⁾があるのみである。

本論文では平面上に配置された 500 kV GIS を例にとり、実機での接地線電流の実測を行ない、ここに提案している計算法の実用性の評価を行なったので報告する。

2. 500 kV GIS の接地線電流と温度上昇

〈2・1〉 接地線電流の分布 接地線電流測定用のロゴウスキーコイルを、変電所の接地メッシュを構成する接地線(主接地線)に取り付け、運転中の 500 kV GIS における接地線電流を正確に把握した、図 1 に

図 1 接地線電流測定用ロゴウスキーコイルの取付状況

Fig. 1. Rogowsky coil mounted on an earthing conductor for measuring the current.

Analysis of Earthing Conductor Current in 500 kV Gas Insulated Substations. By *Syunichi Takami*, Member, *Iori Ii*, Member, *Masanori Yamamoto*, Member (The Kansai Electric Power Co., Inc.), *Shinzou Ogura*, Member, *Toshiharu Adachi*, Member & *Keizou Takatsuka*, Member (Mitsubishi Electric Co.).

高見俊一: 正員, 関西電力株式会社 総合技術研究所

伊井 庵: 正員, 関西電力株式会社 総合技術研究所

山本正則: 正員, 関西電力株式会社 中央送変電建設事務所

小倉新三: 正員, 三菱電機株式会社 伊丹製作所

足立敏治: 正員, 三菱電機株式会社 伊丹製作所

高塚桂三: 正員, 三菱電機株式会社 伊丹製作所

図 2 運転中における接地線電流の実測状況
Fig. 2. Field measurement of the current in earthing conductors.

GIS のベース下部の主接地線に取り付けたログウスキーコイルの写真を示す。

上記のログウスキーコイルを埋設した変電所 (C 変電所) の実測状況の写真を図 2 に示す。図 3 に C 変電所の機器配置、主回路電流方向および接地線電流の実

測結果を示す。

C 変電所において測定した接地線電流の最大値は 9.5% (主回路電流に対する百分率) であり、その箇所はしゃ断器 (CB) 近傍の主接地線である。また、架台と主接地線とを接続している接地線 (立ち上がり接地線) に流れている電流の最大値は 6.4% で、その箇所はブッシング (Bsg) 架台の立ち上がり接地線である。

図 3 において接地線配置および主回路電流が、中央の Bsg に対し、左右対称であれば、接地線電流も左右対称に流れるが、変電所では接地線配置などが左右対称でないため、接地線電流も左右対称に流れていない。

主な誘導電流路は

- (a) CB—変流器 (CT)—立ち上がり接地線—主接地線—立ち上がり接地線—CT—(CB)
- (b) Bsg—立ち上がり接地線—主接地線—立ち上がり接地線—断路器 (DS)—(Bsg)

の二流路である。流路 a は主回路との磁気的結合が流路 b に比べて強く、その割りにインピーダンスが低いいため、流路 a に流れる接地線電流は流路 b よりも大きい値を示す。

流路 a, b ともに一方の立ち上がり接地線と他方の立ち上がり接地線に流れる電流が異なっている。これは機器のベースと接触している配筋 (コンクリート補強用の鉄筋) などに流れる電流が存在するためである。

図 3 接地線電流分布 (C 変電所 500 kV GIS, 運転中)

Fig. 3. Current distribution in earthing conductors (500 kV GIS in C Substation in service)

図 4 500 kV GIS における接地線電流の最大値
Fig. 4. Maximum value of the earthing conductor current in a few 500 kV substations.

〈2・2〉 接地線電流の最大値 立ち上がり接地線に流れる接地線電流を他の3変電所においても実測した。

実測箇所はA変電所、3ベイ9相分、B変電所、4ベイ12相分、D変電所は1相分である。

1相内で立ち上がり接地線、および主接地線に流れる電流の最大値（主回路電流に対する百分率）を図4に示す。図から4変電所において、接地線電流の最大値は13.0%であり、各相の接地線電流の最大値の中で、最も少ない値は3.6%である。そして、平均値は7.3%である。

同様な構造をしたGISにおいて、このように接地線電流の最大値が異なっている主な原因としては、

- (a) 運転状態が異なる（主回路電流の流れ方）。
- (b) 接地線の敷設状態が異なる。
- (c) GIS 架台を設置しているベースと配筋との電気的接続状態が異なる。

が考えられる。

〈2・3〉 接地線の温度上昇 接地線電流と温度上昇との関係を把握するため、簡易実験を行なった。図5にその実験状況と測定結果を示す。実験結果にほぼ合致する実験式は

$$\Delta T = k \times 10^{-4} \cdot I_e^{1.7} \dots \dots \dots (1)$$

である。ここで、 k は実験定数であり、接地線の設置位置（土中、気中、コンクリート中）および断面積に

図 5 接地線の温度上昇値

Fig. 5. Temperature rise of earthing conductors.

表 1 実験定数 (k)

Table 1. The experimental constants.

接地線の断面積 (mm²)	実験定数 (k)		
	気中	土中	コンクリート中
100	21.2	12.5	7.86
200	8.76	5.76	4.54

より異なる。表1にその値を示す。実験式(1)による曲線を図中の実線(100 mm²)および点線(200 mm²)で示している。

これらの実験結果は小規模な実験モデルによる結果であり、変電所の場合とは多少異なると考えられるが、このデータをもとにして接地線の温度上昇を概略推定してみる。

変電所における接地線電流の最大値は〈2・2〉節の実験結果の場合、主回路電流に対し13.0%である。定格電流は4,000 Aであるから、接地線に520 A流れる。接地線の温度上昇を図5の実験結果から推定すると約19 degである（接地線の断面積200 mm²、コンクリート中）。

接地線配置、機器構造の大幅な変化がなく、主回路電流を大電流化(12,000 A)すると、温度上昇は約122 degと推定される。周囲温度を加算すると、銅線の電氣的、機械的性能の劣化をきたさない限界温度(200°C)⁽⁴⁾ 近くなり、接地線の前記劣化、並びに、コンクリートのひび割れの恐れ、および水の蒸発が考えられる。従って、主回路電流を大電流化すると、現状

の接地線配置, および接地線サイズを適用することが困難な場合が生ずる。このため, 接地線電流の低減化が必要な場合がある。

3. 接地線電流計算法

GIS の接地線電流路を構成している接地線, GIS の架台, タンクなどをインピーダンスに置き換え, 接地線電流を計算する。

〈3.1〉 計算仮定 主な計算仮定を下記に示す。

- (a) 接地線電流路の近傍にある鉄製構造物 (DS 操作箱類, 配筋など) が, 接地線電流路のインピーダンスに与える影響を無視している。
- (b) 変電所における基礎のコンクリート, 土じょう中に流れる大地帰路電流の影響は無視している。
- (c) CB, Bsg, DS などのタンクに流れる電流の分布は均一とし, 後述する円筒素線を用いている。
- (d) 架台を構成している H, L 形鋼間, および H, L 形鋼と接地線間の相互インダクタンス (M) は, H, L 形鋼を素線で表現した非磁性素線間の M を用い, 自己インダクタンス (L) および実効抵抗 (R) は実験値 (〈3.4〉節参照) を用いている。

〈3.2〉 基本方程式 素線で架台, 接地線などを表現するが, その基本図を図 6 に示す。 i を素線に流れる電流 (素線電流), i_n を素線端に流入する電流 (流入電流), v を素線端部間の電圧 (素線電圧), v_n を素線端の電圧 (節点電圧) とすると, 基本方程式は周知のように, 下記の 3 式で示される。

$$[T]' \cdot [i] = [i_n] \quad (1)$$

$$[T] \cdot [v_n] = [v] \quad (2)$$

$$[Z] \cdot [i] = [v] \quad (3)$$

ここで, $[T]$ は素線電圧と節点電圧との関係を示す変換行列, $[T]'$ は $[T]$ の転置行列, $[Z]$ は架台, 接地線などの形状から決定されるインピーダンス行列

図 6 素線基本図

Fig. 6. Schematic model for theoretical analysis.

である。

$[Z]$ を抵抗成分 $[R]$ とインダクタンス成分 $[X]$ とに分け,

$$[Z] = [R] + j[X] \quad (4)$$

逆行列 $[Z]^{-1}$ を下式のように表わすと,

$$[Z]^{-1} = [P] + j[Q] \quad (5)$$

$[P]$ および $[Q]$ は (4), (5) 式から

$$[P] = [(R) + (X)[\alpha]]^{-1} \quad (6)$$

$$[Q] = -[\alpha] \cdot [P] \quad (7)$$

但し,

$$[\alpha] = [R]^{-1}[X] \quad (8)$$

となる。なお, (8) 式は $\alpha_{lm} = X_{lm}/R_{ll}$ で容易に求められる。

従って, 節点電圧 $[v_n]$ は

$$[T]' \cdot [(P) + j(Q)] \cdot [T] \cdot [v_n] = [i_n] \quad (9)$$

により求まる。素線電流 $[i]$ は

$$[i] = [(P) + j(Q)] \cdot [T] \cdot [v_n] \quad (10)$$

により求まる。

この方法により, 複素数の逆行列を求めずに計算出来る, 計算精度の向上が計れる。

〈3.3〉 タンクの近似 CB, Bsg, DS などのタンクに流れる誘導電流の分布は近傍の主回路電流, および接地線電流などの影響により, 大きく変化する。従って, 接地線電流の正確な把握には, タンクを多くの素線で表現することが必要である。しかし, タンクの電流分布が変化しても, 接地線電流路のインピーダンス変化が少ないことから, 本計算法ではタンクに流れる誘導電流は, タンク軸方向のみとし, その断面内において均一に流れるとしている。

このような仮定を用いることにより, タンクを一素線 (円筒素線) として表現することができ, 計算精度を落さずに⁽²⁾, 計算時間, 入力時間の縮減ができる。

この円筒素線の自己インダクタンス (L) および相互インダクタンス (M) の考え方を図 7 および下記に

図 7 タンクの円筒素線化

Fig. 7. Self and mutual inductance of tank.

示す。

L, R ; 均一電流が流れているときのタンクの L, R を用いている。

M ; 主回路とその主回路を収納しているタンクとの M は、タンクに均一電流を流した場合の外部インダクタンスとし、タンクと接地線、
 架台との M は、タンクと同じ軸方向の長さ

を有する素線が、タンク中心軸にあると仮定し、その素線との M を用いている。

〈3.4〉 H, L 形鋼および配筋の自己インダクタンスと実効抵抗

(1) 実験値 GIS の架台、ベースおよび変電所基礎内の配筋は磁性体であるため、正確な自己インダクタンス (L)、実効抵抗 (R) を計算できない。従って、

図 8 H 形鋼の実効抵抗, 自己インダクタンス
 Fig. 8. Effective resistance and self inductance of H beams.

図 9 L 形鋼の実効抵抗, 自己インダクタンス
 Fig. 9. Effective resistance and self inductance of L beams.

図 10 配筋の実効抵抗, 自己インダクタンス (φ22)
 Fig. 10. Effective resistance and self inductance of reinforcing bars (φ22).

図 11 配筋の実効抵抗, 自己インダクタンス (φ9)
 Fig. 11. Effective resistance and self inductance of reinforcing bars (φ9).

それらの L , R を実験的に把握し、一部を報告⁽⁵⁾⁽⁶⁾したが、本論文では更に長さ、電流を変えた実験結果を報告する。

図8~11にその実験結果を示す。これらの結果から断面積の少ないもののほど磁気飽和の影響を受け、同じ寸法であっても、電流により L , R が大きく異なることが分かる。また、 H , L 形鋼のリアクタンスは断面積 100 mm^2 の接地線とほぼ同程度の値であるが、実効抵抗は接地線のその2倍程度を示している。しかし配筋 ($\phi 9$, $\phi 22$) の場合はリアクタンス、実効抵抗ともに接地線の場合の5倍以上の値を示す。

(2) L , R の計算フロー 計算データ入力時は誘導電流が不明であるため、 H , L 形鋼および配筋に流れる誘導電流を仮定し、 L , R を実験値により求める。そして、第1回計算後に、計算前に仮定した L , R に対し、計算結果の誘導電流に相当する L , R が20%以上異なる場合は、計算結果の誘導電流に相当する L , R を用いて再計算する。

4. 接地線電流計算法の実用性の評価

前章で述べた計算法を簡易形状のモデル並びに複雑な実機 GIS に適用した例をすでに報告⁽¹⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾し、計算法の実用性を明らかにしている。本論文では下記三種類の実機 GIS を用いた接地線電流の実験と計算との比較を詳細に行ない、計算精度を把握した。

(1) 実機 500 kV GIS を用いた工場における接地線電流模擬実験 (工場実験)

(2) 変電所における単相実験

(3) 変電所運転中 (三相) における実測

〈4・1〉 実験の概要 変電所運転中における実測の概要および結果は第1章で示しているのので、ここでは工場実験と単相実験について示す。

(1) 工場実験 C および D 変電所に設置する 500 kV GIS の工場における二種類の機器配置について実験を行なった。

C 変電所用の 500 kV GIS の工場実験の場合は、主回路電流を B_{sg} から DS に流したが、 D 変電所用の 500 kV GIS の工場実験の場合は、主回路電流を DS に付随している接地装置から流した。図 12 に実験状況の写真を示す。

接地線は変電所のように架台下に設けることが困難であるため、床上に約 1.8m 水平にずらして設けている。また、機器架台下にある埋め込みベースを近似するため、架台の足の下部間を銅バーで接続している。

下記の三ケースについて実験を行なった。

(a) C 変電所用 GIS

図 12 工場実験状況 (500 kV GIS)

Fig. 12. Measurement of current distribution in 500 kV GIS equipment at factory.

(b) D 変電所用 GIS ケース A (図 15 参照)

(c) D 変電所用 GIS ケース B

誘導電流の変化をみるため、ケース A において、CB 両側の CT 架台間 (図 15 の CT_1 , CT_2 間) を接地線で接続した。

(2) 変電所における単相実験 主接地線に流れる電流を測定する接地線電流測定用ロゴウスキーコイルを埋設した変電所 (C 変電所) にて DS に付随している接地装置に通電用バーを介し電源を設け、主回路電流を 1 相だけ流し、接地線電流の測定を行なった。図 13 に実験状況の写真を示す。通路中央に設けているバーが通電用バーである。

図 13 単相実験状況

Fig. 13. Field measurement of current distribution with one phase of GIS

図 14 素線図 (C変電所 500 kV GIS, 運転中)
Fig. 14. Schematic model of 500kV GIS for theoretical analysis.

実験ケースは主回路電流を変え、下記の二ケースについて行なった。

- ・ ケース A CB 1 台に主回路電流が流れる流路
CB—CT—DS—通電用バー—DS—CT—(CB)
- ・ ケース B CB 2 台に主回路電流が流れる流路
CB—CT—DS—Bsg—DS—CT—CB—CT—
DS—通電用バー—DS—CT—(CB)

〈4・2〉 実験と計算との比較 図 14 に C 変電所運転中の接地線電流解析に用いた素線図を示す。架台は複数本の型鋼で構成されているが、計算で 1 ペイ分すべての架台を考慮することは、計算時間が多くなる。従って、着目する部分の架台配置は正確に表現し、他の部分は一つの架台を 1 本の素線で近似的に置き換えて計算している。

つまり、一つの架台を構成している型鋼のすべてに同一電流が流れると仮定し、各々の相互インダクタンス、自己インダクタンスから総合のインダクタンスを

求め、そのインダクタンスに相当する形状をもつ非磁性体の素線 (例えば丸棒) で表現している。そして、架台中央に設けて、タンク下部に接続している。

図 15 に D 変電所用 GIS の工場実験 (ケース A) における接地線電流分布の実験結果と計算結果とを示している。実験で接地線電流の最も多く流れる箇所は DS1 近傍の主接地線であり、18.6% (主回路電流に対する百分率) 流れている。一方、計算値は 18.4% である。

図 16 に工場実験の 3 ケースにおける接地線電流の実験値と計算値との比較を示している。接地線電流の実験値が 10% 以上の箇所における計算誤差は $\pm 20\%$ 以内に入っていることが分かる。

図 16 工場実験における接地線電流の実験値と計算値との比較

Fig. 16. Eartthing conductor current obtained by experiment and calculation.

図 15 接地線電流分布 (D変電所 500 kV GIS, 工場実験, ケース A)

Fig. 15. Current distribution in earthing conductors (500 kV GIS for D substation under factory test).

図 17 接地線電流解析の平均誤差

Fig. 17. Mean value of error in estimating the current in earthing conductors.

接地線電流の実測値の全データ、5%以上、8%以上、および10%以上の箇所における計算誤差の単純平均（平均誤差）を図17に示す。図から工場実験、単相実験および運転中の実測のいずれをとっても、接地線電流が多いほど平均誤差は少ない傾向を示している。

この傾向は下記の二つの理由からきている。

- (a) 接地線電流が少ない箇所は、接地線電流の流路が分かれ、接地線電流が分流している箇所が多い。これらの箇所では、インピーダンスが低く、複雑な誘導電流路および磁性体の多い機器近傍であることから、誤差が多くなっている。
- (b) 接地線電流が多い箇所は、1本の接地線に接地線電流が集っている主接地線、および主接地線に接続している立ち上がり接地線に多い。これらの箇所を含む誘導電流路のインピーダンスは、誘導電流路の多くを接地線が占めているため、明確に求めることができ、接地線電流の平均誤差が小さい傾向を示す。

工場実験における平均誤差はすべて20%以下であり、接地線電流が8%以上では平均誤差は10%以内である。

一方、単相実験および運転中の実測の場合は接地線

電流が10%以上では平均誤差が15%以内となっているが10%以下の接地線電流を含む平均誤差は大きな誤差を示している。

これは、工場実験では接地線の配置が明確であるが変電所では不明の箇所が多くあり、また基礎内の誘導電流が接地線電流だけでなく、配筋などに流れる誘導電流があるためである。

5. むすび

500 kV GIS における接地線電流の最大値を4変電所、25相について実測し、現状の接地線電流値を概略把握した。更に接地線の温度上昇試験により、現状の接地線配置のままでは、主回路電流が大電流化したときに、問題が生ずる場合があることを指摘し、任意の接地線配置における接地線電流を解析する実用的な計算法を確立した。

この計算法の精度把握を実機を用いた工場実験、変電所における単相実験、および運転中の実測を通じて行なった。

その結果、誘導電流路が明確である工場実験の場合は、接地線電流の多い箇所（主回路電流に対し8%以上流れている箇所）で10%以内の平均誤差で求めた。また、接地線配置が不明確であり、配筋などに流れる不明な誘導電流路がある変電所の場合でも、接地線電流が10%以上の箇所では、平均誤差が15%以内で求められ、実用的な計算法であることが分かった。

終りに、この研究を進めるにあたり、御指導と助言を賜り、また、実測データを得るうえで御協力を頂いた関係者各位に深く感謝の意を表します。

(昭和58年2月12日受付、同58年9月5日再受付)

文 献

- (1) 高見，他：「ガス絶縁開閉装置における接地線の簡易モデルによる実験と計算」昭54電気関係学会関西支部連大 G3-46
- (2) 高見，他：「ガス絶縁開閉装置における接地線電流の簡易計算法」昭55電気学会全大 No. 1080
- (3) 鎌田，他：「現地通電試験によるミニクラッドの誘導電流測定とその解析」昭56電気学会全大 No. 1157
- (4) 電中研報告：発電所耐雷設計基準要綱，電力 64019
- (5) 高見，他：「接地線電流解析における架台の実効抵抗及び自己インダクタンスの実験的把握」昭54電気関係学会関西支部連大 G3-47
- (6) 小倉，他：「接地線電流解析における配筋の実効抵抗及び自己インダクタンスの実験的把握」昭56電気関係学会関西支部連大 G8-52
- (7) 高見，他：「ガス絶縁開閉装置における接地線電流解析法」昭55電気関係学会関西支部連大 G3-69
- (8) 高見，他：「ガス絶縁開閉装置における接地線電流解析法（500 kV 変電所の単相実験と計算との比較）」昭56電気学会全大 No. 1156