

耐雷性評価に対応した接地システム検査手法の開発

森田 岳* 佐藤 大記**
田中 弘毅*** 道下 幸志#

Development of New Inspection Method for Evaluation of Earthing Systems for Lightning Protection

Gaku MORITA Daiki SATO
Hiroki TANAKA Koji MICHISHITA

This paper describes a new inspection equipment and a new circuit structure used for evaluation of lightning protection performance of the earthing system in railway substations. The new inspection equipment consists of an impulse generator and a measurement unit, and allows the inspector to measure the earth resistance, the high frequency earth impedance and the voltage difference of an earthing system without advanced knowledge. The new measurement circuit for the inspection of the earthing system only requires existing infrastructures, i.e. an independent earthing for a remote terminal unit, an earthing system of adjacent substation and an overhead contact line. Therefore, the proposed circuit requires no temporary earth rods for measurement.

キーワード：接地システム，耐雷性，接地抵抗，接地インピーダンス，電位差，検査装置

1. はじめに

変電所等の電力設備に設けられる接地システムは，地絡故障や雷撃時等に流れる異常電流や，これらに伴って生じる過電圧から人体および電気設備を防護するものである。その重要性から法令（電気設備に関する技術基準および同解釈基準など）により，接地抵抗の上限値，施工方法等が規定されている。一方，接地システムの維持管理における検査には次のような課題がある。

- (1) 法令適合性の確認は，直流や商用周波数（50/60Hz）といった低周波の特性（接地抵抗）評価で行うが，雷撃のような高周波現象（10kHz～1MHz程度）を対象とする評価はこれに含まれていない。このため，接地抵抗が十分低い変電所が雷害を受けた事例が報告されている¹⁾。
- (2) 耐雷性評価を行う検査は，専門会社によって実施されてきた¹⁾が，2種類の独立した検査（接地インピーダンスの測定，電位差の測定）が必要であり，特殊な検査装置と技能が必要となる。
- (3) 検査実施のためには，供試の接地システムとは独立した試験用接地極を仮設する必要があるが，特に周辺に余剰地を有さない都市部の変電所等ではこれが困難な場合がある。

そこで本報告では上記課題に対応するため，接地システムの耐雷性を容易に評価可能な検査装置の開発と，接地システムの耐雷性評価のための新しい検査回路の提案を行った。

2. 従来の接地システム検査

接地システムに対する検査には，法令にもとづく接地抵抗の測定（低周波特性）と，耐雷性評価のための接地インピーダンスの測定，電位差の測定（高周波特性）とがある。

2.1 接地抵抗の測定

接地抵抗の測定は，法令で定められた接地抵抗の基準値（例えば10Ω）を満たすことを確認する検査である。その検査方法は発変電規程²⁾により電圧降下法と接地抵抗計による測定の2種類が規定されており，鉄道事業者はこれに準じて実施基準規程を定めている³⁾。

電圧降下法（図1）はJR各社における変電所の接地システムとして採用されているメッシュ接地などの大規模接地に対する検査手法として規定されている。試験電流（20A以上を目安）を通電する電流注入回路と，電位上昇（GPR: Ground Potential Rise）を測定する電位測定回路の二つの独立した回路から成り，電流の帰線となる試験用接地極（C）と電位基準（真の大地）となる試験用接地極（P）の二つの接地極の仮設が必要である。また，周辺の送配電線等からの影響を取り除くため，3回の測

* 電力技術研究部 き電研究室
** 電力技術研究部 き電研究室（現 諏訪東京理科大学）
*** 西日本旅客鉄道株式会社
静岡大学

特集：電力技術

定と後処理が必要となる。

数本の接地棒などで構成される小規模の接地システムに対しては、接地抵抗計を用いた検査手法が規定されている。接地抵抗計は電圧降下法に類似した回路構成を用いるが、数 mA ～数 A の小さな試験電流通電によって、1 操作で簡易に接地抵抗を評価するものである。電圧降下法に比べ、装置およびデータ処理が大幅に簡略化されることがこの手法の特長である。

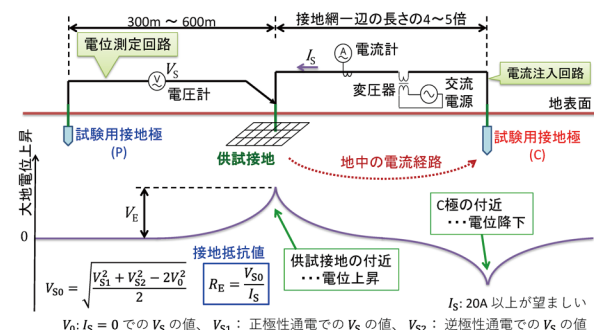


図1 電圧降下法の検査回路

2.2 接地インピーダンスの測定

雷撃時における接地システムの GPR の指標となるのが接地インピーダンスであり、模擬雷（雷インパルス）注入によりこれを測定する。一般に、接地システムに雷電流が流入すると接地システムは非線形の分布定数回路として動作するため、この接地インピーダンスは図2に示すように時間に対して変動する特性となり、数十マイクロ秒を経て定常特性である接地抵抗に収束する^{1) 5)}。

接地インピーダンスのピーク値であるサージインピーダンス（文献によってはインパルスインピーダンスとも呼ばれる）は、耐雷性評価において重要な値である。変電所等の接地システムのような大規模接地においては、低周波の接地抵抗に比べてサージインピーダンスがより大きな値となることが通常である。

接地インピーダンスの測定回路は、検査装置が異なる他は電圧降下法とほぼ同様である。接地インピーダンスは、GPR の瞬時値を電流の瞬時値で除することで求められる。測定においては専門会社が所有する検査用のインパルス電圧発生器（以下、PG）から模擬雷を供給する。接地インピーダンスの時間変動特性に最も影響するパラメータである電流の波頭長は、PG では 0.05μs 程度と非常に短い値に設定されている。これは、過去の雷電流の統計⁴⁾ において最も厳しい条件となる、後続負極性短時間雷撃の 95% をカバーする波頭長 0.22μs より十分短い値である（表 1）。ただし、短い波頭長と大電流を両立するインパルス発生器の製作は困難であり、現在の PG の電流波高値は 1A 程度と小さく、後述の電位差の測定には適さない。

電流および電位上昇の測定は、高周波電流センサとオシロスコープを用いて行い、接地インピーダンスおよびその評価値となるサージインピーダンスの算出は、時間変動波形の記録データに対する後処理により行う。

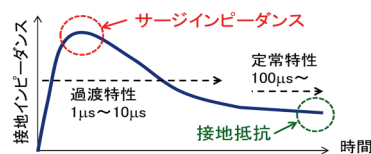


図2 接地インピーダンスの時間特性（模式図）

表 1 雷電流の統計値⁴⁾

パラメータ	累積頻度					雷撃種別
	98%	95%	80%	50%	5%	
電流波高値	4kA	—	20kA	—	90kA	第一負極性短時間
	—	4.9kA	—	11.8kA	28.6kA	後続負極性短時間
	—	4.6kA	—	35kA	250kA	第一正極性短時間(単一)
波頭長	—	1.8μs	—	5.5μs	18μs	第一負極性短時間
	—	0.22μs	—	1.1μs	4.5μs	後続負極性短時間
	—	3.5μs	—	22μs	200μs	第一正極性短時間(単一)
雷撃継続時間	—	30μs	—	75μs	200μs	第一負極性短時間
	—	6.5μs	—	32μs	140μs	後続負極性短時間
	—	25μs	—	230μs	2000μs	第一正極性短時間(単一)

2.3 電位差の測定

雷撃時に接地システム内で大きな電位差が生じると、回路等を通してサージ電圧・電流が伝搬し設備損傷等のリスクが大きくなる。特に等電位化は近年の雷保護技術の基本とされており^{4) 5)}、これは電位差（接地システム内の 2 点の電位差）の測定によって評価できる。接地インピーダンスと接地抵抗の関係と同様に、低周波における電位差よりも、雷撃時のような高周波領域における電位差はより大きな値となる。

電位測定を接地システムの 2 点以上で行い、それらの差から電位差を評価するが、これを正確に行うためには接地システムの隅々にまで電流を伝搬させる必要があり、PG では容量不足となる。そのため、数十 A 以上の波高値の電流出力が可能な、専門会社が所有する検査用のインパルス電流発生器（以下、IG）を電源として用いる。IG は中型車に据え付けて運用される大きさであり、可搬性の観点で課題がある。電流と波頭長はトレードオフとなるため、IG 出力電流の波頭長は数 μs と PG より 1 桁程度長くなる。過去の雷電流の統計と照らし合わせると、第一負極性短時間雷撃の 50% 程度をカバーする評価が可能と想定される（表 1 参照）。

3. 接地システム検査装置の開発

3.1 開発の基本方針

接地システムの検査に用いられている従来の検査装置の課題を解決するため、以下の基本方針において新しい

検査装置（以下、単に検査装置という）の開発を行った。

- (1) 単一の検査装置で接地抵抗，接地インピーダンス，電位差の全てを測定可能とする。
- (2) 全雷撃の約95%をカバー可能な波頭長0.2μsでの評価を可能とする。
- (3) サージインピーダンスの値によらず一定した電流波形を供給可能とする。
- (4) 評価値の算出処理を自動化し，検査実施に特殊技能を不要とする。
- (5) 保守用自動車で運搬可能とする。

3.2 検査装置の仕様

本検査装置は電源部と計測部から構成され，図3のとおり結線を行えば，接地抵抗，接地インピーダンス，電位差が一回の通電で測定可能である。装置全体の外観を図4に示す。

検査装置の構成および回路を図5に示す。電源部の筐体(Ef)と出力の負極(C)・正極(E-c)とを絶縁(耐圧40kV)することにより，操作者の感電防止のための追加の防護措置を不要とした。計測部については，ノイズ低減と機器の防護のために筐体(Ef)と内部構成機器に対して等電位ボンディングを行った上で，試験用接地極(P)との間を絶縁(耐圧40kV)した。

3.3 検査装置の構成

3.3.1 電源部

電流発生方式として雷インパルス発生器を採用し，従来の検査装置に適用されているPGとIGの2つの機能を併せ持った回路を新たに設計した。

出力抵抗は1kΩから4kΩの間で可変とした。これらの値は接地システムのサージインピーダンス(数十Ωから数百Ω程度)よりも十分大きく，接地システムに対して電流源として振る舞うため，従来の電源装置で見られた電流波形の振動やなまりといった課題を解消することができる。自然雷は電流源と見なせるため^{4) 5)}，物理現象からも合理的と考える。出力電流の波高値は10A

から40A程度と従来のIGと同程度であり，接地インピーダンスと電位差の両方の測定に必要な十分な値である。

波頭長は0.2μsから5.0μsの範囲で可変とした。なお，波頭長の下限值0.2μsは従来のPG(0.05μs)よりも大きい値となっているが，これは自然雷の模擬として波頭長0.05μsは厳しすぎる条件であると判断したためである(表1参照)。接地抵抗を評価可能とするため，波尾長は100μs以上と十分長くなるよう設計した。

評価項目	備考	技術基準
接地抵抗	必須検査	有り
接地インピーダンス	雷撃時の電位上昇に関係	無し
電位差	等電位ボンディングに関係	無し

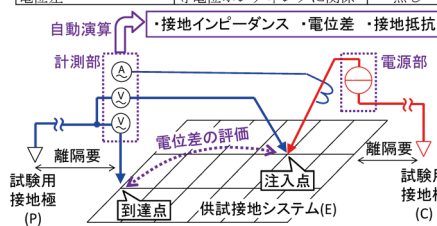


図3 開発検査装置を用いた接地システムの検査回路

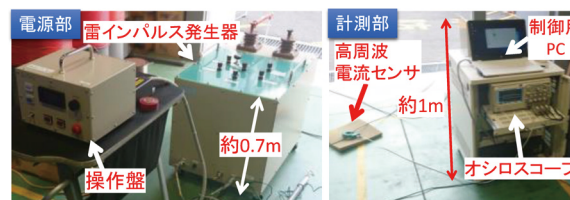


図4 開発した接地システムの検査装置の外観

3.3.2 計測部

計測部はオシロスコープ，制御用ラップトップコンピュータ（以下，制御用PC），およびその他の付属装置から構成される。低圧電源からのノイズ侵入を低減するため，測定時には低圧電源を切り離し，無停電電源装置からの電源供給で動作させる。電位測定端子は接地インピーダンスと電位差の測定に使用する2端子，試験用接地極(P)と計測部の電位差を測定する1端子である。電流は付属の高周波電流センサ（貫通式）により測定する。

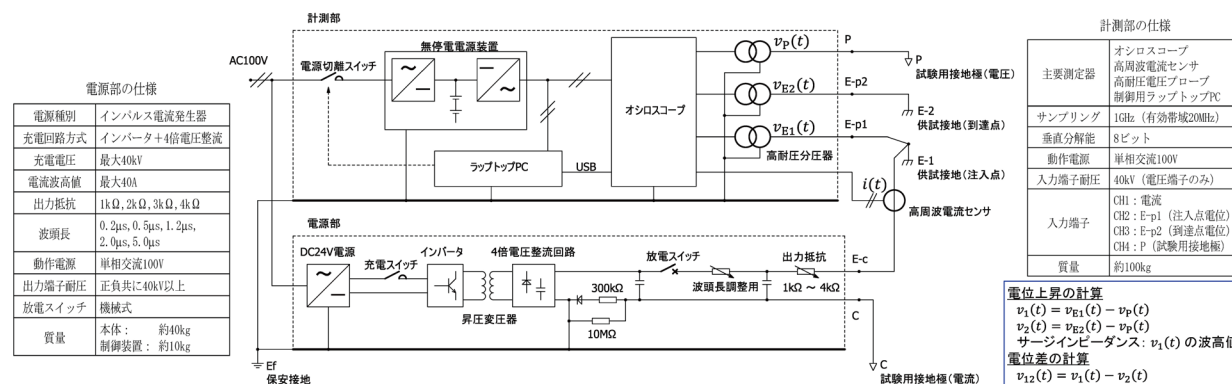


図5 接地システム検査装置の回路構成

特集：電力技術

また、以下に示すように評価値の計算を行うアルゴリズムを開発し、評価機能として実装した。

- (1) 測定データ（時間領域の波形）には概してノイズが含まれるため、二次の低域通過フィルタ（デジタルフィルタ）により、これらを除去する。
- (2) 電流の波形（立上りの部分）から、データ処理を行う領域（十分大きな電流が流れておりノイズの影響が小さい領域）を抽出する。
- (3) 測定器のオフセットを算出し測定値から差し引く（零点補正）。
- (4) 試験電流注入点の電位上昇 $v_1(t)$ を出力電流 $i(t)$ で除して接地インピーダンス $z_E(t)$ を計算する（ t ：時刻）。このピーク値からサージインピーダンスを、また $z_E(t)$ の収束値（記録時間の終端における値）から接地抵抗を、それぞれ算出する（図2参照）。
- (5) $v_1(t)$ と到達点の電位上昇 $v_2(t)$ の差から電位差 $v_{12}(t)$ を計算する。

3.4 検査精度の確認

開発した検査装置の精度を現地試験により確認した。多雷地区の一線区（単線の直流電化）を対象とし、同線区におけるA, B, Cの3変電所において接地システムの検査を行った（表2）。各変電所の周囲土壌（地質）は表に記載の通り、乾燥、標準的、湿潤の3条件である。これら変電所の受電用避雷器接地線の立ち上げ部地下には、導電性コンクリート充填による接地インピーダンス低減対策が実施されていた。検証は、開発した検査装置による測定結果と、しゅん功検査の結果または専門会社による測定結果とを比較することで行った。

試験回路は図1の通りとし、受電用避雷器S相の接地線に試験電流を注入した。供試接地システムと試験用接地極P, Cとの離隔は、それぞれ50～100m程度、10m～50m程度とした。電位差測定における到達点は受電用避雷器から10m程度離れた整流器周辺とした。

表2 試験対象の変電所

線区	主要変成器	大地抵抗率	
A変電所	単線, 直流電化	整流器(3000kW)1バンク, 高配用変圧器(500kVA)1台	820 Ω・m (乾燥)
B変電所		整流器(4000kW)1バンク	80 Ω・m (標準的)
C変電所		整流器(4000kW)1バンク	8.2 Ω・m (湿潤)

3.4.1 電流波形

注入する試験電流の波形の安定性を検証するため、波頭長の設定を最も厳しい条件である0.2μsとした場合について、変電所毎の電流波形を比較した（図6）。出力抵抗（図5参照）が1kΩの場合、電流の立上り（特に放電開始から3μs程度までの期間）のばらつきが大きく、

実際の出力電流の波頭長は変電所により0.2μs～1.0μs程度と異なり安定しなかった。出力抵抗を2kΩとすると波頭長は所期の0.2μs程度で安定し、若干の振動成分があるものの変電所による波形のばらつきはかなり低減した。出力抵抗を4kΩまで増加させると、電流波形の安定性はさらに向上した。

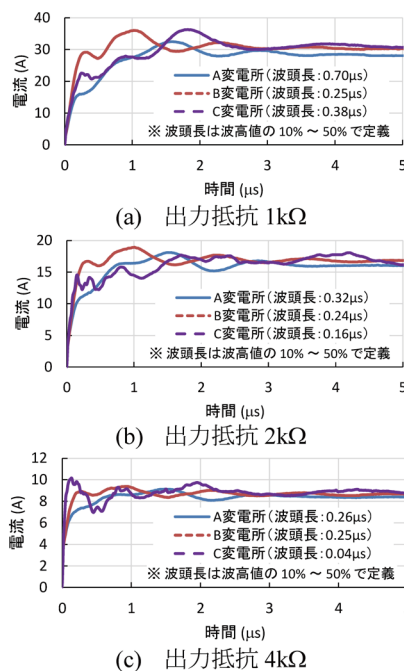


図6 検査装置の出力電流波形（波頭長0.2μsに設定）

3.4.2 接地抵抗の測定

検査装置による接地抵抗の評価精度の検証は、変電所新設時におけるしゅん功検査において電圧降下法（実施：変電所の施工会社）により測定された値（以下、基準値）と比較することにより行った（表3）。

接地抵抗値が相対的に高いA変電所においては、出力抵抗の値によらず検査装置の評価値と基準値とは良好に一致した。一方、接地抵抗値が低いB, C変電所においては両者の誤差が大きくなるケースがあるが、これは検査装置の計測部（オシロスコープ）の分解能の限界によるものである。これら変電所ではサージインピーダンスと接地抵抗のオーダーが2桁程度異なっているが、前者を測定可能な電圧レンジで測定するため、後者の評価においては分解能が不足するためである。

しかし、接地抵抗の基準値（例えば5Ω以下）への適合性確認には十分な精度である。以上より、接地抵抗の

表3 接地抵抗の測定精度確認（電流波頭長：0.2μs）

出力抵抗	今回開発した検査装置				基準値 (しゅん功検査)
	1 kΩ	2 kΩ	3 kΩ	4 kΩ	
A変電所	4.2 Ω	4.4 Ω	3.9 Ω	4.1 Ω	4.33 Ω
B変電所	0.0 Ω	0.6 Ω	0.3 Ω	0.2 Ω	0.39 Ω
C変電所	0.0 Ω	0.1 Ω	0.2 Ω	0.2 Ω	0.18 Ω

測定については、検査装置は変電所の定期検査に十分適用可能であることを確認した。

3.4.3 接地インピーダンスの測定

接地インピーダンスのピーク値（サージインピーダンス）について、検査装置の評価値とPGを用いた専門会社による評価値¹⁾とを比較した（表4、データはB,C変電所のみ存在）。その結果、出力抵抗が1kΩ～2kΩ程度の場合、両者の評価値は最大誤差20%程度と良く一致した。

3.4.4 電位差の測定

電位差のピーク値について、検査装置の評価値とIGを用いた専門会社による評価値¹⁾とを比較検討した（表5）。検査装置の電流波頭長はIGと同じ値の2.0μsとし、電位差のピーク値を試験電流波高値で割った相対値で比較を行った。データの存在するB,C変電所では、検査装置による評価値は、専門会社によるそれに対して最大誤差20%から50%程度で一致した。

出力抵抗と電位差の評価値の関係を見ると、A,B変電所では出力抵抗の増大に伴って評価値が増大する傾向にあるが、C変電所ではそのような傾向は見られない。これはC変電所よりも大地抵抗率が大きく抵抗区域が広いA,B変電所では、出力抵抗3kΩ以上（電流波高値で概ね10A以下）では十分な電流が供給できていないためと考えられる。

一方、開発した検査装置ではIGよりも1桁短い波頭長0.2μsの模擬雷電流までを出力可能である。IGでは全雷撃の約50%をカバーする評価であるのに対し、本検査装置では約95%をカバーする評価が可能である。そこで、上記最短の波頭長で電位差を測定した結果を表6に示す。何れの変電所においても波頭長2.0μs（表5）

表4 サージインピーダンスの測定精度確認

出力抵抗	今回開発した検査装置				基準値 (専門会社)
	1 kΩ	2 kΩ	3 kΩ	4 kΩ	
A 変電所	43.7 Ω	50.1 Ω	60.5 Ω	53.3 Ω	—
B 変電所	40.4 Ω	40.9 Ω	39.6 Ω	39.7 Ω	37.6 Ω
C 変電所	37.2 Ω	43.4 Ω	49.6 Ω	55.5 Ω	42.0 Ω

※ 基準値（専門会社評価値）は文献1による。
 ※ 電流波頭長は検査装置で約0.2μs、専門会社で約0.05μsと異なる。
 ※ サージインピーダンスの定義は検査装置と専門会社で異なる。

表5 電位差の測定精度確認（電流波頭長：2.0μs）

出力抵抗	今回開発した検査装置				基準値 (専門会社)
	1 kΩ	2 kΩ	3 kΩ	4 kΩ	
A 変電所	11.5 V/A	13.9 V/A	15.5 V/A	16.0 V/A	—
B 変電所	12.8 V/A	13.8 V/A	15.4 V/A	16.9 V/A	9.5 V/A
C 変電所	8.8 V/A	11.3 V/A	11.7 V/A	9.0 V/A	7.2 V/A

※ 基準値（専門会社評価値）は文献1による。

表6 電位差の測定精度確認（電流波頭長：0.2μs）

出力抵抗	今回開発した検査装置			
	1 kΩ	2 kΩ	3 kΩ	4 kΩ
A 変電所	34.7 V/A	40.2 V/A	50.3 V/A	45.7 V/A
B 変電所	32.1 V/A	35.9 V/A	37.8 V/A	40.7 V/A
C 変電所	18.6 V/A	20.0 V/A	20.9 V/A	19.9 V/A

に対して2～3倍の評価値となり、より厳しい条件における評価が可能であることを確認した。

4. 耐雷性評価のための新しい検査回路の提案

4.1 検査回路の構成

試験用接地極の仮設および測定線の延線が不要となる、接地システムの新しい検査手法の提案、およびその検証を行った。提案する検査回路は図7に示す構成であり、図1の基本回路と等価回路は同様であるが、試験用接地極Pとして供試変電所等の遠制接地、試験用接地極Cとして隣接変電所の接地システム、電流注入回路の一部（帰線部）として電車線路を用いる点に特徴がある。

なお、類似した回路構成による接地抵抗の検査手法が、先行研究において新幹線用変電所の接地システムを対象に検討されている⁶⁾。この検討では隣接変電ポストをC,P両方の試験用接地極として用いることを提案しているが、電位測定回路に対する誘導（干渉）が大きく、隣接変電ポストのP極への適用は困難であることが指摘されている⁶⁾。

この先行研究に対する本提案の新規性は、遠制接地を試験用接地極Pとして適用することと、高周波を対象とする耐雷性評価（接地インピーダンス、電位差の測定）にもそのままこの回路構成を適用することである。

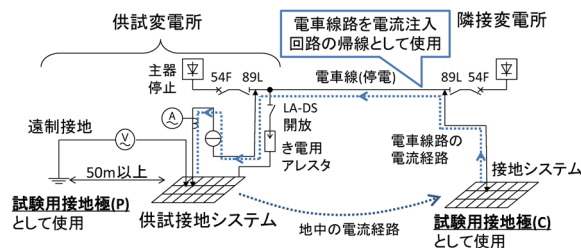


図7 接地システムの新しい検査回路の回路

4.2 検査精度の確認

新しい検査回路による測定精度を現地試験（前記A,B,C変電所）により検証した。具体的には提案した検査回路（図7）による評価結果と、従来の試験回路による検査（以下、従来回路）による結果との比較を行った。何れの回路においても、開発した検査装置を用いて接地抵抗、接地インピーダンス、電位差の測定を行った。試験電流の波頭長は0.2μsとした。

4.2.1 接地抵抗の測定

接地抵抗の評価値を回路方式で比較した結果を表7に示す。変電所、出力抵抗の違いによらず、従来回路と提案回路による検査装置の評価値はほぼ一致した。よって、先行研究の結果⁶⁾において懸念された遠制接地への誘導（干渉）は十分小さく、接地抵抗の測定に対しては提案回路は十分適用可能であることがわかった。

表7 接地抵抗の測定結果比較

出力抵抗	1 kΩ		2 kΩ		3 kΩ		4 kΩ	
	従来	提案	従来	提案	従来	提案	従来	提案
A 変電所	4.2 Ω	4.3 Ω	4.4 Ω	4.4 Ω	3.9 Ω	4.7 Ω	4.1 Ω	4.1 Ω
B 変電所	0.0 Ω	1.2 Ω	0.6 Ω	1.1 Ω	0.3 Ω	1.0 Ω	0.2 Ω	1.1 Ω
C 変電所	0.0 Ω	0.6 Ω	0.1 Ω	0.5 Ω	0.2 Ω	0.5 Ω	0.2 Ω	0.4 Ω

4.2.2 接地インピーダンスの測定

サージインピーダンスの評価値(電流波頭長 0.2μs)を、回路方式で比較した結果を表8に示す。変電所、出力抵抗の違いによらず、従来回路と提案回路の評価値はほぼ一致した。よって、耐雷性評価において重要な高周波領域においても、電位測定回路ならびに遠制接地への誘導は十分小さいと言え、接地インピーダンスの測定に対しても提案回路は適用可能であることが確認できた。

なお、提案回路では電流注入回路として従来回路よりも長大線路である電車線路を用いており、進行波の減衰が大きくなる。このため一部試番では、従来回路による接地インピーダンスの測定において、第1進行波のピーク値よりも反射波のピーク値が大きくなり、サージインピーダンスを誤判定(反射波で評価)する例が見られたが、提案回路による測定では反射波が小さく、こうした問題は発生しなかった(図8(a))。

表8 サージインピーダンスの測定結果比較

出力抵抗	1 kΩ		2 kΩ		3 kΩ		4 kΩ	
	従来	提案	従来	提案	従来	提案	従来	提案
A 変電所	43.7 Ω	41.4 Ω	50.1 Ω	44.8 Ω	60.5 Ω	48.1 Ω	53.3 Ω	51.2 Ω
B 変電所	40.4 Ω	36.5 Ω	40.9 Ω	36.9 Ω	39.6 Ω	38.3 Ω	39.7 Ω	40.1 Ω
C 変電所	37.2 Ω	33.2 Ω	43.4 Ω	35.2 Ω	49.6 Ω	35.2 Ω	55.5 Ω	37.8 Ω

4.2.3 電位差の測定

電位差のピーク値(電流波頭長 0.2μs)を回路方式で比較した結果を表9に示す。前述の接地インピーダンスと同じく、従来回路と提案回路の評価値は全ての条件でほぼ一致した。これより、電位差の測定に対しても提案回路は適用可能であることが確認された。図8(b)に電位差の波形例を示す。

5. まとめ

変電所等の接地システムに対する新しい検査手法を開発した。接地システムの技術基準適合性および耐雷性を評価可能な検査装置を新たに開発し、現地試験により低周波特性(接地抵抗)および高周波特性(接地インピーダンスと電位差)を、十分な精度で評価可能であることを確認した。

また、隣接変電所の接地システムと自変電所の遠制接地を試験用接地極に適用する新しい検査回路を提案した。現地試験により、接地抵抗、接地インピーダンス、

電位差を十分な精度で評価可能であることを確認した。

今回検討の成果は、接地システムの定期検査への導入の他、雷害対策工事の効果検証、弱点設備の洗い出しなどにも活用可能である。

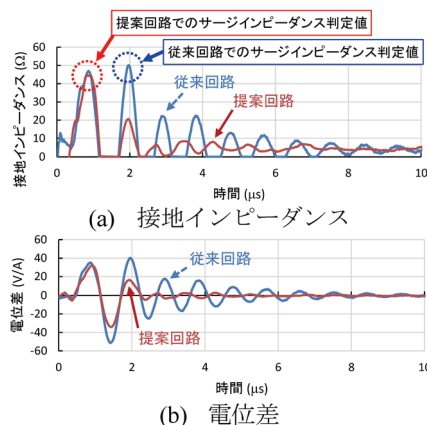


図8 検査装置の測定波形比較 (A 変電所, 出力抵抗 2kΩ)

表9 電位差の測定結果比較

出力抵抗	1 kΩ		2 kΩ		3 kΩ		4 kΩ	
	従来	提案	従来	提案	従来	提案	従来	提案
A 変電所	34.7 V/A	26.5 V/A	40.2 V/A	32.1 V/A	50.3 V/A	37.2 V/A	45.4 V/A	40.8 V/A
B 変電所	32.1 V/A	26.0 V/A	35.9 V/A	30.0 V/A	37.8 V/A	34.0 V/A	40.7 V/A	37.2 V/A
C 変電所	18.6 V/A	20.3 V/A	20.0 V/A	22.2 V/A	20.9 V/A	22.3 V/A	19.9 V/A	17.7 V/A

謝辞

検査装置の開発にあたりご協力を頂いた、音羽電機工業株式会社の古賀氏をはじめ関係者にお礼申し上げます。

文献

- 馬庭和之, 信田慶二, 小原敏明, 田原岳, 若槻豊, 伊東和彦, 田中弘毅, 山野井隆, 川原敬治: 電鉄用変電所における接地網の耐雷に関する一考察, 電気学会研究会, TER - 14 - 036, 2014
- JEAC5001, 発変電規程, 発変電専門部会, 日本電気協会, pp.321-324, 2017
- 直流電気鉄道用変電所の保護システムに関する調査, 日本鉄道電気技術協会, pp. 61-72, 2017
- 電気・電子機器の雷保護, 電気設備学会, オーム社, pp.18-27, pp.153-155, 2011
- 山本和夫, 酒井志郎, 柳川俊一, 山田康春: SPD・避雷器と耐雷トランスを用いた雷保護, オーム社, pp.60-65, pp.96-104, 2015
- 山下博史, 田中弘毅, 赤木雅陽, 森田岳, 高橋克二, 荘田崇人: き電回路を活用した接地抵抗測定法の実現に向けた課題検討, 電気学会, 平成 26 年産業応用部門大会, pp. V-159 - V-162, 2014