

新幹線き電回路用避雷器の劣化監視装置の開発

田中 弘毅* 安喰 浩司** 森本 大観*

赤木 雅陽* 吉井 剣*

Development of Deterioration Monitor for Surge Arresters of Shinkansen Feeding Circuit

Hiroki TANAKA Kohji AJIKI Hiroaki MORIMOTO

Masataka AKAGI Tsurugi YOSHII

Currently, there are the following two methods to evaluate the degradation of feeder surge arresters at Shinkansen substations. One method is to count the number of lightning strokes by surge current counter device. However, some of surge current counter devices may count small discharge current of arrester due to switching surge voltage in changeover sections, which does not affect the degradation of the arrester. The other method is to measure the leakage current at normal status. However, this may not be a reliable method because the leakage current is strongly affected by harmonics of feeding voltage. We have developed a jig with functions of suppressing unwanted counting of small surge current and providing accurate measurements of leakage current of the target arrester. This paper describes various field measurement results, the principle of the developed jig and a new extracting method of resistor-part current of arrester from the entire measured leakage current.

キーワード：交流電気鉄道，避雷器，劣化管理，漏れ電流

1. はじめに

新幹線き電回路用避雷器は、外線からの雷サージや車両で発生する開閉サージを吸収し、機器の絶縁を保護する機能を持つ。現在、この避雷器の劣化を管理する手法には、接地回路にカウンタを設置して動作回数を管理する方法、および漏れ電流値を管理する方法がある。

しかし、新幹線固有の切替開閉器動作時のサージ電圧は、避雷器の劣化に寄与しない放電を生じさせることがあるためカウンタが不要に動作する場合がある¹⁾。また、汎用のクランプ形電流計では正確な漏れ電流の測定が困難であることから、適正な劣化管理手法が求められている。

そこで筆者らは、避雷器のカウンタの動作を適正化するとともに、正確な避雷器漏れ電流波形の測定を可能とする装置を考案した。さらに、考案した装置を新幹線変電所に仮設し、避雷器漏れ電流とサージ電流測定を行った。その結果、装置が正常に機能し、また漏れ電流波形から避雷器の劣化診断に有効な抵抗分電流の検出が可能であることを確認したので報告する。

2. 避雷器の設置位置と等価回路

図1に一般的な避雷器の設置位置を、図2に避雷器の等価回路を示す。避雷器は、等価的に酸化亜鉛素子抵抗 R と漂遊容量(対地静電容量) C の並列回路で表すことができる。抵抗 R は印加電圧によって抵抗値が変化するとともに、素子の劣化によっても抵抗値が変化の特徴を持つ¹⁾。また、避雷器接地回路において測定できる電流は、静電容量分電流 I_C と抵抗分電流 I_R が合算された全漏れ電流 I_0 である。

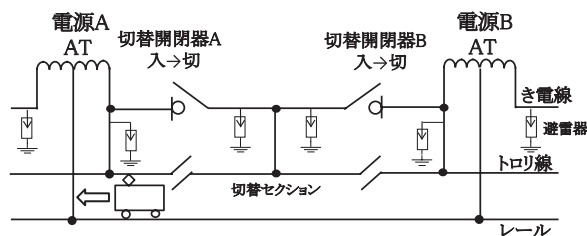


図1 避雷器の設置位置

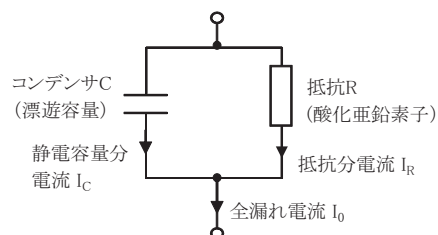


図2 避雷器の等価回路

* 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 株式会社サンコーシヤ)

特集：電力技術

3. 新幹線き電回路用避雷器の電流

図1のように避雷器は高圧回路と接地間に接続され、過大な雷サージ電圧が侵入した際に放電することによって過電圧を抑制し機器の絶縁破壊を防護する機能を持つ。一方、新幹線のき電回路用避雷器においては切替開閉器動作時のサージ電圧により放電電流が流れる場合がある²⁾。

3.1 全漏れ電流

図3に新幹線変電所で実測したき電回路用避雷器の全漏れ電流 I_0 の波形を示す。 I_0 は、印加電圧波形に対してほぼ90度進み位相であることから、静電容量分 I_C が支配的であることが分かる。また、 I_C には多くの高調波が含まれることが多く、 I_0 の測定値は、高調波の含有量に大きく影響される。

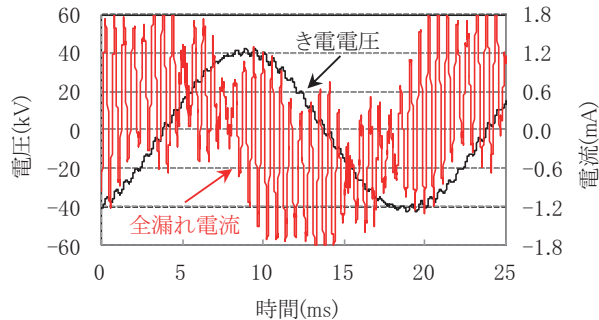


図3 新幹線変電所における避雷器全漏れ電流波形

3.2 切替開閉器サージ電圧による放電電流

次に、切替開閉器動作時のサージ電圧による放電電流がき電回路用避雷器に流れる一例を示す。

一般的な交流電気鉄道は、三相電力系統からき電用変電所を介して三相二相変換を行い、方面別に位相の異なる二つの単相交流によってき電されている。このため変電所およびき電区分所では、異なる位相の電圧が突き合わされた状態になっている。新幹線では異電源突き合わせ箇所にて約1kmのセクションを設け(切替セクション)、切替開閉器により電車の進行に合わせて電源を切り替えて、電車が力行のまま通過できるようにしている(図1)。切替開閉器の開閉動作により発生するサージ電圧は、電車が切替セクションに進出した時の開閉動作によるものと、電車がセクションを通過後に待機状態に戻る時の開閉動作によるものがある。図4(a)に列車通過後の開閉サージ電圧の一例を示す³⁾。また、図4(b)に切替開閉器が待機状態に戻る際に発生した電流波形の例を示す。図4(b)では避雷器に95Aの放電電流が流れており、切替開閉器による避雷器の放電現象が確認できる。なお、切替開閉器によるサージ電圧は、これまでの実測結果^{2) 3)}により40kV～100kV程度であることが知られている。

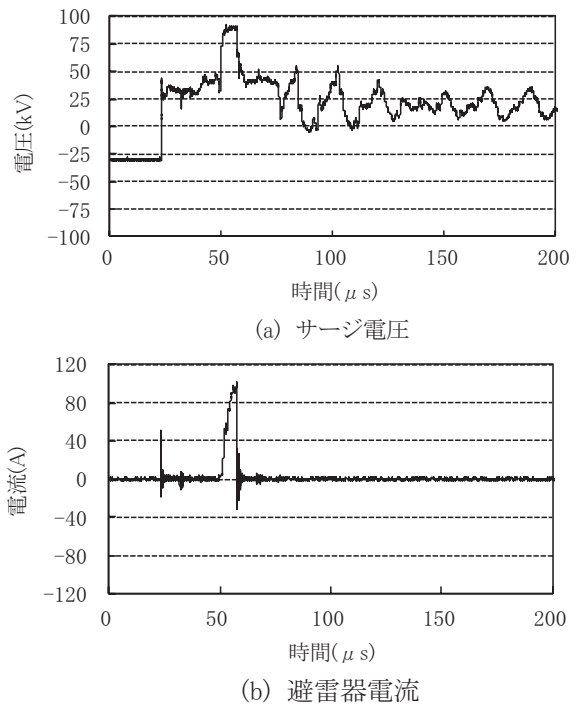


図4 切替開閉器投入時のサージ電圧波形

4. 従来の避雷器劣化診断技術

課電状態での従来の避雷器の劣化診断技術を以下に示す。

4.1 全漏れ電流検出方式

避雷器素子が劣化すると、絶縁抵抗 R が低下し抵抗分電流 I_R が増加する。その結果、抵抗分電流 I_R と静電容量分電流 I_C の合成値である全漏れ電流 I_0 が増加する。この全漏れ電流 I_0 の値で素子の絶縁状態の良否を判断する方法である。

4.2 ベクトル演算による抵抗分電流検出方式

電圧ベクトル V と抵抗分電流ベクトル I_R の位相が一致することを利用し、電圧ベクトル V と全漏れ電流ベクトル I_0 の位相差 Φ を求め、全漏れ電流ベクトル I_0 の余弦成分($I_0 \cdot \cos \Phi$)から抵抗分電流 I_R を求め絶縁状態を診断する方法である。抵抗分電流のみ分離するので、全漏れ電流検出方式よりも信頼性は高いと言えるが、高調波の影響をフィルター等によって除去する必要があり、また複雑な演算回路を必要とする。

4.3 カウンタ動作回数による管理

新幹線における変電ポスト(変電所、き電区分所、ATポスト)の避雷器の接地回路には、雷サージ電圧により避雷器が放電した際に動作するカウンタが設備されている。しかし、新幹線の変電所およびき電区分所では、電車通過毎に動作する切替開閉器の開閉サージ電圧により、100A程度の小電流放電でカウンタが動作する場合

がある²⁾。このとき、雷サージによる放電履歴との区別が困難なため、カウンタ動作回数を劣化管理に用いることの信頼性が薄れてしまう。

既設の避雷器用カウンタの回路を図5に示す。この回路に避雷器の放電電流が流れると、まずコンデンサに充電される。充電電圧が酸化亜鉛素子（バリスタ）の動作開始電圧に達すると放電電流はバリスタに流れ、充電電圧はバリスタの制限電圧に抑えられる。コンデンサに充電された電荷は抵抗を介して電磁形計数器に流れ動作させる。カウンタの最小動作電流は、波尾長が $10\mu\text{s}$ 程度の雷インパルス電流において $40\text{A} \sim 50\text{A}$ 程度である。

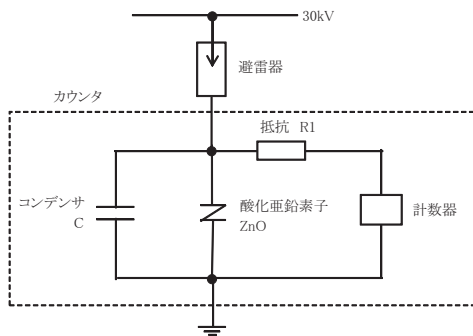


図5 避雷器のカウンタ回路

5. 避雷器電流検出装置の試作

5.1 避雷器電流検出装置の構成

図6は切替開閉器サージ電圧によるカウンタの不要動作の防止、および正確な全漏れ電流波形の測定を目的として考案・試作した装置の回路である。図6の左側の回路がカウンタ不要動作防止回路であり、右側が全漏れ電流測定回路である。スイッチSを開放すれば漏れ電流測定端子に全漏れ電流波形が電圧に変換されて出力される⁴⁾。また、試作した装置を変電所に仮設した様子を図7に示す。

5.2 カウンタ不要動作防止機能

5.2.1 不要動作防止原理

切替開閉器動作に伴う開閉サージ電圧は、実測の結果によると $40\text{kV} \sim 100\text{kV}$ 程度であり、その際に避雷器に流れる放電電流は最大 100A 程度である。この程度のサージ電圧による避雷器の多頻度動作では、実運用上問題となる劣化を生じない²⁾。そこで図6の左側に示す抵抗 R_G と放電管 D_1 、後述するバリスタから成るカウンタ不要動作防止回路を用いて、開閉サージ程度の放電電流によるカウンタ動作を防止する。スイッチSは、漏れ電流測定時に開放するためのもので、常時閉である。

避雷器が放電した場合、放電電流 i_0 は抵抗 R_G に流れ、抵抗端子間に電圧 v_R が発生する。このとき、 i_0 は漏れ電流測定回路にも分流するが、抵抗 R_{m1} および R_{m2} は R_G に比べて十分大きな値であるため、分流はほとんど無視で

きる。 v_R が放電管の放電開始電圧 v_G 以下($v_R < v_G$)であれば、放電電流はカウンタをバイパスして直接アースに流れる。しかし、 $v_R < v_G$ となるような放電電流が流れた場合には、放電管 D_1 が放電しカウンタに電流が流れる。例えば、抵抗 R_G の値を 1.5Ω 、放電管 D_1 の放電開始電圧 v_G を 350V とすると、避雷器放電電流 i_0 が約 230A 以下であれば放電管 D_1 は放電しないのでカウンタに電流は流れず不要動作を防止できる。なお、放電管 D_1 と直列に接続したバリスタはカウンタ内のコンデンサに蓄えられた電荷の逆流を防止するためのものである。このバリスタがない場合はコンデンサから計数器に流れる電流が減少し、避雷器放電電流が大きいものにも関わらずカウンタが動作しない可能性が生じる。

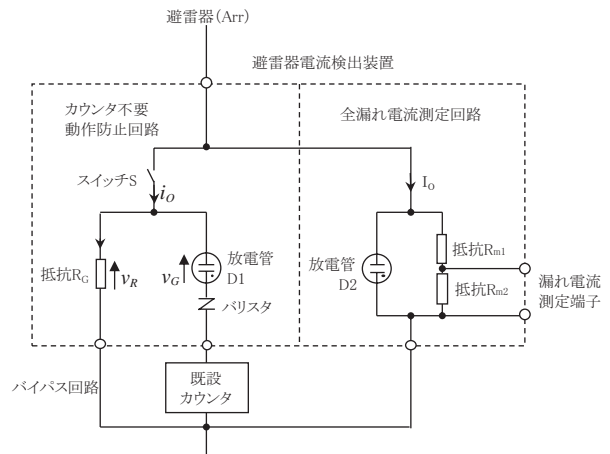


図6 避雷器電流検出装置の構成

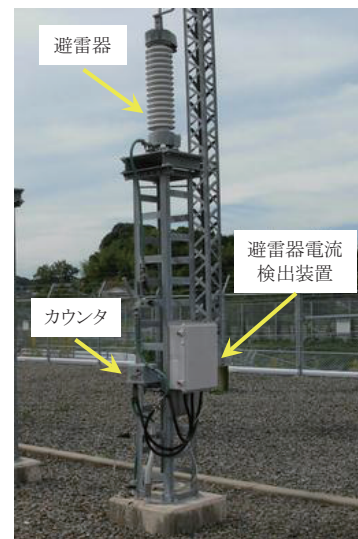


図7 避雷器電流検出装置の仮設風景

5.2.2 雷サージによる避雷器放電電流

直撃雷電流の大きさの50%値(平均値)は 25kA 程度と言われている。しかし、遠方の電車線路に直撃雷があった場合、支持がいしでフラッシュオーバ(せん絡)するため変電所に到達するサージ電圧はがいしのフラッシ

特集：電力技術

オーバ電圧で制限される。長幹SKがいしの雷インパルスフラッシュオーバ電圧は、せん絡保護方式としてせん絡導線方式（二重絶縁方式）を用いている場合、正極性で381kV、負極性で472kV（実測値）であるが、仮に400kVのサージ電圧が変電所に到達し、電車線のサージインピーダンスが200Ωだったとすると避雷器に流れる電流は2000A（400kV_{0-P} ÷ 200Ω）程度になると思われる。

したがって、カウンタは避雷器に2000A程度以上流れたときに動作すれば雷サージによる放電回数を記録することができる。

5.2.3 不要動作防止回路の効果

試作した避雷器電流検出装置を変電所の子電回路用避雷器の接地回路に挿入して、切替開閉器動作時のサージ電流に対する装置の動作状態を確認した。代表的波形を図8に示す。図8を見るとサージ電圧は立ち上がり点（時間軸20μsから27μs後に大きく上昇している。このときバイパス回路には約100Aのサージ電流が流れているが、カウンタには電流が流れておらずカウンタは動作しなかった。以上により避雷器電流検出装置のカウンタ不要動作防止機能は正常に機能したと判断する。またサージ電圧立ち上がり点等の急峻な電圧変動においては、カウンタ回路およびバイパス回路に振動電流が観測された。

一方、図9は雷インパルス発生器を用いて避雷器に650Aを通电した波形である。このとき放電管D₁が放電し、カウンタに85Aが流れカウンタは動作した。よって2000A程度以上と予想される雷サージ電流に対し、カウンタは確実に動作すると言える。以上の結果、試作した避雷器電流検出装置を避雷器の接地回路に挿入すること

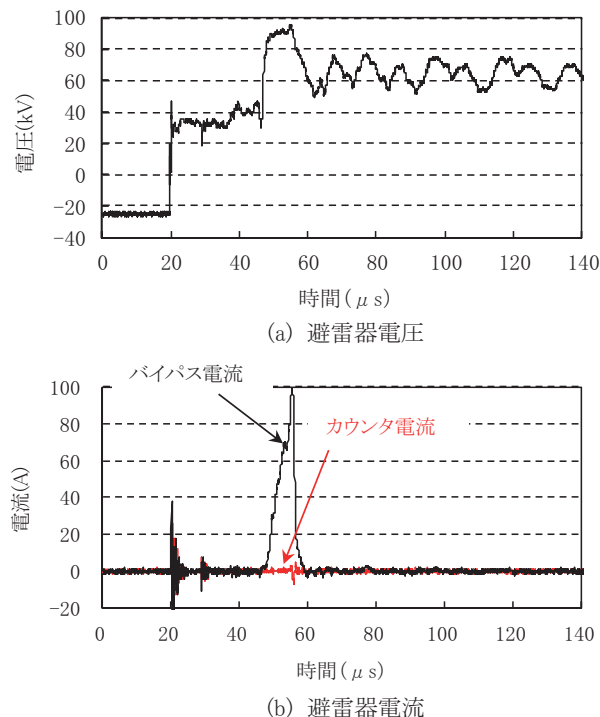


図8 カウンタ不要動作防止回路電流

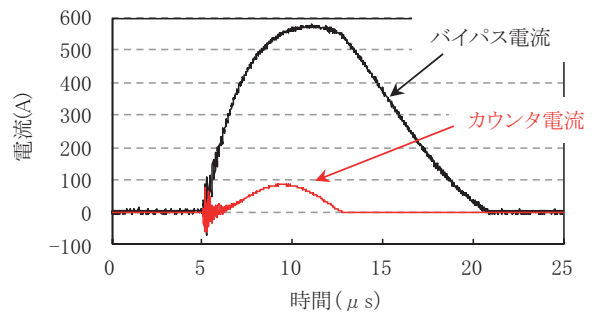


図9 カウンタ動作時の波形（雷インパルス試験）

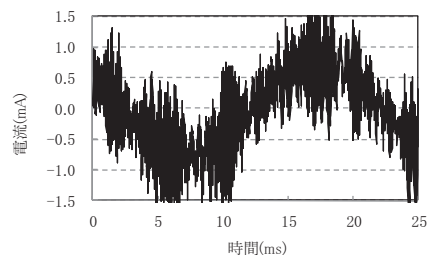
により、カウンタは100A程度の開閉サージ電流では動作しないが、雷サージ電流では確実に動作することが確認された。

5.3 全漏れ電流波形測定機能

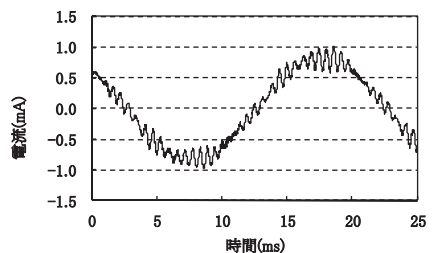
避雷器の漏れ電流は、避雷器の接地回路で測定することが出来る。ただし避雷器の接地回路で測定できる電流は前述のように I_C と I_R が合算された全漏れ電流 I_0 であるが、 I_C が支配的である。したがって全漏れ電流にわずかに含まれる I_R の増加を検知し素子劣化の診断を行うには I_0 を高い精度で測定する必要がある。

本装置ではスイッチSを開放すると避雷器電流は全漏れ電流測定回路の無誘導抵抗 R_{m1} （100kΩ）と R_{m2} （5kΩ）にのみ流れ、全漏れ電流波形は R_{m2} の端子間電圧波形を測定することで検出することができる。しかし測定中に切替開閉器の動作等によるサージで避雷器が放電し、サージ電流が全漏れ電流測定回路に流れ、過大なサージ電圧が発生することが予想される。

そこでサージ電圧に対する防護として抵抗と並列に直流通電開始電圧が550Vの放電管D₂を接続することで抵



(a) クランプ形電流計による測定波形



(b) 避雷器電流検出装置による測定波形

図10 避雷器電流検出装置とクランプ形電流計の測定波形比較（同期測定）

抗に印加される電圧を抑制し、さらに抵抗 R_{m1} (100k Ω) を漏れ電流測定用の抵抗 R_{m2} (5k Ω) と直列に接続することにより、抵抗 R_{m2} に発生するサージ電圧を、放電管 D_2 で抑制されたサージ電圧の 1/20 に減じることができる。

なお、避雷器の抵抗は 1000M Ω 以上であり、それに対し 100k Ω は 0.01% 以下なので、100k Ω の抵抗を接地回路に挿入することによる全漏れ電流に対する影響はない。図 10 に汎用のクランプ形電流計で測定した全漏れ電流波形と、避雷器電流検出装置（無誘導性抵抗）により測定した全漏れ電流波形の比較を示す。無誘導性抵抗による測定波形ではノイズ等の影響を受けにくく正確な波形を得られることが分かる。

6. 抵抗分電流検出

6.1 検出原理

避雷器漏れ電流波形と避雷器電圧波形から抵抗分電流を検出する方法について以下にその詳細を示す。図 11 にその原理を示す。

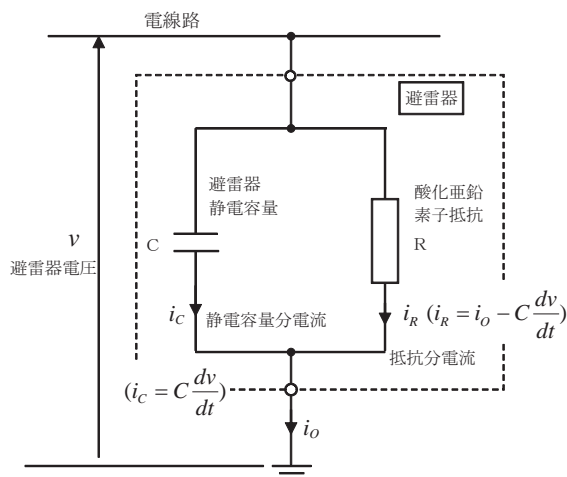


図 11 電圧波形微分による抵抗分電流検出原理

図中の電圧・電流の記号はすべて瞬時値を示す。避雷器の静電容量 C とすると C に流れる電流 i_c は (1) 式で表される。

$$i_c = C \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

全漏れ電流 i_o は静電容量分 i_c と抵抗分 i_R の和であるから、 i_R は (2) 式となる。

$$i_R = i_o - i_c \quad (2)$$

(1) 式を (2) 式を代入することで抵抗分 i_R は (3) 式のように求めることができる。

$$i_R = i_o - C \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

したがって避雷器電圧 v の波形と全漏れ電流 i_o の波形

を実測し、電圧波形 v を微分して (3) 式を適用すれば抵抗分電流波形 i_R が求まる。また抵抗分電流の実効値 I_R は (4) 式により求まる。 C の正確な値が不明な場合は、(4) 式において I_R が最小となるように C の値を調整すると、その最小値が求める抵抗分電流 I_R となる。

$$I_R = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_o - C \frac{dv}{dt})^2 dt} \quad (4)$$

T : 交流電流周期 (50Hz / 60Hz)

6.2 波形近似式を用いる方法

電圧波形を微分する方式は、アナログ的に処理する方式とデジタル的に処理する方式がある。本稿では汎用測定器で得た波形データを演算処理する方法について検討し抵抗分電流 i_R の検出を試みた。

この手法では、電圧波形の微分波形を得る必要があるが、測定データの差分から求めると瞬時的変動が大きく適切な波形を得ることが困難である。そこで、測定した電圧波形を関数式で近似し、近似式を数学的に微分する手法を用いた。(5) 式が電圧波形の近似式で (6) 式は (5) 式を微分した式である。

$$v(t) = a_0 + a_1 \sin(\omega t + \phi_1) + a_2 \sin(2\omega t + \phi_2) + \dots + a_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (5)$$

$$\frac{dv(t)}{dt} = \omega a_1 \cos(\omega t + \phi_1) + 2\omega a_2 \cos(2\omega t + \phi_2) + \dots + n\omega a_n \cos(n\omega t + \phi_n) \quad (6)$$

電圧波形の近似式を求める手法としては、(5) 式の振幅 a_n および位相 ϕ_n に適当な初期値を与え、実測データとの 2 乗誤差が最小となる最小 2 乗法を用いた。求めた振幅値および位相値を (6) 式に与えれば電圧波形の微分波形が求まり、その電圧微分波形を (3) 式に適用すれば抵抗分電流波形 i_R が求まる。

6.3 検出結果

試作した避雷器電流検出装置により実測した全漏れ電流波形と (3) 式による抵抗分電流波形を図 12 に示す。図 12 (a) は変電所の既設計器用変圧器出力と同変電所のみ電回路用避雷器の全漏れ電流を処理した結果である。図 12 (b) は試験用変圧器を用いて車両用避雷器に過電圧を印加することにより劣化時と同様の抵抗分電流を発生させ、本装置により測定した全漏れ電流波形から抵抗分電流を検出した結果である。

図 12 (a) は漏れ電流波形に高調波が多く含まれている例であるが、抽出した i_R の波高値は 0.06mA であり避雷器が正常であることが分かる。これに対し図 12 (b) では明らかに i_R が増加しており、過電流による避雷器劣化が分かる。以上の結果より本手法によりの確に抵抗分電流の検出がなされたと考える。

特集：電力技術

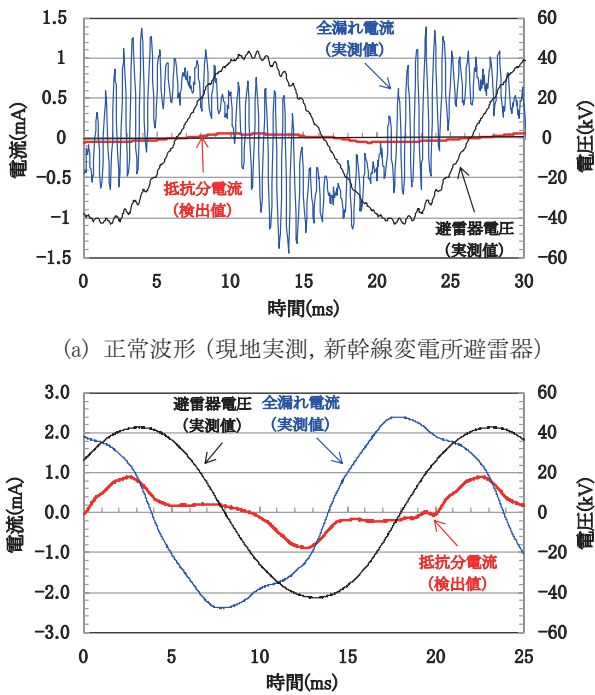


図 12 検出した抵抗分電流波形

6.4 環境条件による影響

図 13 に雨天時に測定した新幹線き電回路用避雷器の漏れ電流波形を示す。全漏れ電流値は実効値で0.1mA程度であり、晴天時の値に比べ非常に小さい値であった。これは、避雷器の負極側を絶縁しているがいし表面が、雨水により湿潤し絶縁低下した影響である。

避雷器負極がいし表面の絶縁抵抗が低下すると、全漏れ電流が負極がいし表面に分流するため、避雷器電流検出装置に流れる電流が減少する。その結果、抵抗分電流値の全漏れ電流値に対する比が晴天時に比べて大きくなる。したがって雨天時等でがい管表面が湿潤しているときは、避雷器電流検出装置による漏れ電流測定値には大きな誤差が発生する可能性が高い。

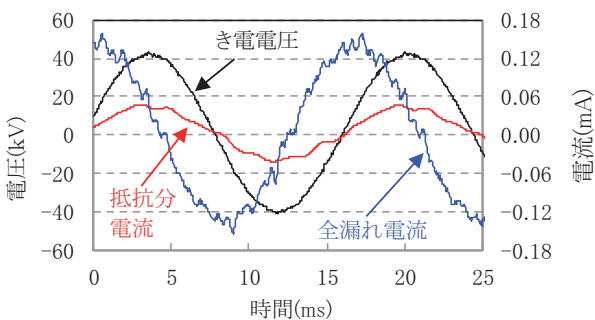


図 13 雨天時の漏れ電流測定波形

7. まとめ

- (1) 避雷器の全漏れ電流は、避雷器の静電容量分電流と素子電流（抵抗分電流）の合成で表わされ、全漏れ電流は避雷器電圧に対してほぼ90度進み位相であったことから、静電容量分電流が支配的である。
- (2) 変電所において切替開閉器動作時のサージ電圧と避雷器電流の測定を行った。その結果、切替開閉器投入時に90kV程度以上のサージ電圧が発生することにより避雷器に100A程度の電流が流れることを確認した。
- (3) 避雷器カウンタの最小動作電流は、波尾長が10μs程度の雷インパルス電流において40A～50Aであることを実験により確認した。これは切替開閉器動作時にカウンタが不要動作する現象と一致する。
- (4) 試作器により測定した全漏れ電流波形と、既設の計器用変圧器で測定したき電電圧波形から避雷器素子電流である抵抗分電流を検出する方法を検討した。その結果、電圧波形を関数式で近似し、その関数式を数学的に微分した波形から静電容量分を求め、それを全漏れ電流から減算することにより抵抗分を求める方法が有効であることを確認した。
- (5) 今回提案した避雷器電流検出装置を導入することによりカウンタの不要動作を防止し、さらに避雷器の劣化診断に有効な避雷器素子電流（抵抗分電流）の検出が可能となる。今後これらのデータの蓄積により適正な避雷器の劣化管理が行えるようになることを考える。

文献

- 1) 滝澤清行, 安喰浩司, 日野政巳, 伊藤田和仙:「新幹線き電用避雷器の劣化管理手法に関する基礎検討」, 平成21年電気学会全国大会, No.5-603, 2009年3月
- 2) 堀江俊介, 高木和憲, 刀禰秀明, 小川知宏, 林屋均, 森野昇平:「放電電流レベルを峻別できる避雷器動作カウンタの開発」, 平成20年電気学会東京支部連合研究会, 交通・電気鉄道研究会 TER-08-34
- 3) 安喰浩司, 兎束哲夫, 稲見一彦, 内沼夏織:「エアーレス新幹線用切替開閉器のサージ電圧測定結果」, 平成16年電気学会産業応用部門大会, No.3-52, 2004年8月
- 4) 滝澤清行, 安喰浩司, 吉井剣:「新幹線き電用避雷器の漏れ電流による劣化管理手法」, 平成21年電気学会産業応用部門大会, No.3-34, 2009年8月
- 5) 安喰浩司, 森本大観, 赤木雅陽, 日野政巳, 阿武大輔, 内沼夏織:「新幹線き電用避雷器における避雷器電流検出装置の試験結果」, 平成22年電気学会全国大会, No.5-503, 2010年3月