

高圧配電線路用避雷器の劣化表示手法

樋口 靖展* 赤木 雅陽* 森本 大観*

Deterioration Indication Method of Arrester for High Voltage Distribution Line

Kiyonobu HIGUCHI Masataka AKAGI Hiroaki MORIMOTO

High voltage distribution lines contribute to supplying stable power to important facilities such as signaling system. In the lines, arresters are provided every a certain distance to avoid system trouble by abnormal voltage by the thunder surge etc. However, since any changes are not seen in the appearance when the arresters equipped in non-grounded lines deteriorates, a long time might be required to find fault point resulting in long downtime of the system. Therefore, to reduce the downtime, an indicator for deterioration of the arrester using a microcomputer has been developed. The indicator always monitors leak current to ground from the arrester to indicate the mark “under operation” when the current exceeds preset minimum operating current and its duration time. This paper also reports the test results of the performance of the indicator and the protection coordination test with protection relay in substation.

キーワード：高圧配電線路，高圧避雷器，地絡，劣化診断，時限協調，保護継電器

1. はじめに

鉄道の高圧配電線路は、信号保安装置や踏切保安設備に電力を供給する自動信号高圧配電線路と、一般的な電灯設備に電力を供給する電灯電力高圧配電線路の2種類がある¹⁾。前者は信号等、列車の運行に直結する重要負荷への電力供給を担うものであり、高品質な電力の安定供給が求められる。後者は主に駅の照明や沿線の保守設備への電力供給とともに、前者の予備系としての役割も担うが、近年、バリアフリー設備、自動券売機、自動改札機等の、重要度が高い負荷機器も増加している。

電力安定供給の要求は、高圧配電線路の種類に関わらず高まる一方であり、故障発生時の影響は計り知れないものになっている。そのためにも、故障発生時のダウンタイム縮小が求められている。その一方、高圧配電線路の亘長は数キロから数十キロに及ぶため、故障点探索に時間を要することもあり²⁾、この故障は結果として長時間にわたり安定輸送に悪影響を及ぼし得る。加えて近年、高圧ケーブルを多用する高圧配電線路も数を増やしており、設備構成に即した故障点探索が求められている。

故障点探索を容易にするための研究開発はこれまでも行われているが、直流電気鉄道の沿線で多く用いられている非接地系の高圧配電線路に設置された高圧避雷器の故障に対しては、十分な検討が行われていなかった。高圧避雷器の内部劣化による故障は外観から容易に判断できないことも多いため、鉄道事業者では以前から故障点特定探索に苦慮しているのが現状である³⁾。

* 電力技術研究部 き電研究室

そこで本論文では、非接地系の高圧配電線路に設置された高圧避雷器について現状の保護システムの見直しを行い、高圧避雷器劣化表示器の提案と試作を実施して現地試験等により提案手法の妥当性を確認する。

2. 現在の高圧配電線路の保護と故障点標定

高圧配電線路には、地絡や短絡を検知する保護継電器と故障設備を特定する装置が設置されている。このうち、故障の検知は変電所や配電所（以降、変電所で表記を統一する）に設けられている保護継電器が担っている。一方、具体的な故障点の特定の支援のために、高圧ケーブル故障検知器、変圧器絶縁破壊検知器といった、個別の対象物に取り付けられる表示器がある。

2.1 保護継電器

2.1.1 地絡過電圧継電器（64）

地絡過電圧継電器⁴⁾(図1)は変電所に設置されており、主に非接地系の単相高圧配電線路で使用される。高圧配電線路の対地電圧を検出するため、接地型計器用変圧器(EVT)の一次側を各相と接地に接続している。EVT二次側は各相を直列に接続し、制限抵抗を接続し閉ループを構成する。正常時における制限抵抗の電圧は0Vであるが、地絡発生時は、EVT一次側の対地電圧が各相で不平衡になり、制限抵抗に電圧が発生する。地絡過電圧継電器はこの制限抵抗の電圧を監視し、整定以上の電圧となった時に、軽故障(64L)や重故障(64D)として動作する。

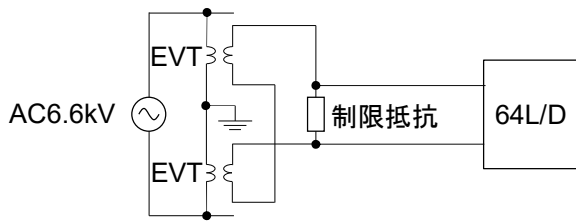


図1 地絡過電圧継電器概要図

2.1.2 地絡方向継電器（67）

地絡方向継電器⁴⁾（図2）も変電所に設置されており、主に非接地系の三相高圧配電線路で使用される。地絡方向継電器は母線に設置されるEVTの三次側回路であるブロークデルタ結線の開放端に取り付けられる制限抵抗の電圧を零相電圧として、各回線に設置された零相変流器（ZCT）から零相電流を検出する。地絡故障が発生すると、当該回線は母線から故障点の方向に零相電流が流れるが、健全回線にはその対地静電容量を介して回線から母線の方向に零相電流が流れる。地絡方向継電器はZCTに流れる零相電流と基準EVTの電圧位相とを比較して電流方向を求め、故障の発生した回線のみ警報を出力する仕組みとなっている。

地絡方向継電器はJEC-2512により仕様が定められており、零相電流に対する継電器動作値の整定値の最小値は1mA（実効値、以下同じく）となっている。また、ZCTはJEC-120で仕様が定められており、定格零相一次電流が200mA、定格零相二次電流は1.5mAとなっている。上記より、地絡方向継電器が動作する最小電流は、零相一次電流に換算すると133mAとなる。動作時間は一般的に数秒以内に整定されている。

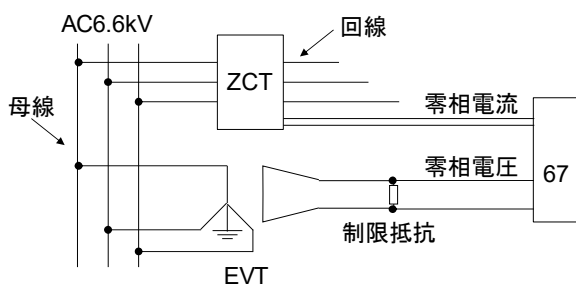


図2 地絡方向継電器概要図

2.1.3 過電流継電器（51）

過電流継電器も変電所に設置されており、変流器（CT）二次側に接続されている。高圧配電線路の短絡事故や過負荷により、高圧配電線路や変圧器巻線の電流が許容値を超過した場合に、遮断器を開放させる。過電流継電器には反限時特性要素と瞬時特性要素があり、短絡事故では瞬時特性要素が動作するため、速やかな故障点除去が行われる⁴⁾。

2.2 故障設備の特定

2.2.1 高圧ケーブル故障検知器

高圧ケーブルは高圧導体の周囲に遮蔽銅テープを設けて接地に接続することで、人がケーブル表面を触っても感電しないという特徴がある。そのため、ピットやトラフ内などのように人が近接する可能性のある箇所や、架空用絶縁電線を敷設することが困難な箇所に数多く敷設されているが、それらの箇所は目視が難しいことが多く、故障が発生したときには故障点の探索に多くの時間を要する。この対策として、故障した高圧ケーブルを特定できる高圧ケーブル故障検知器が開発されている。故障検知器は遮蔽銅テープと接地の間に流れる電流を監視している。高圧ケーブル故障時には、地絡電流は遮蔽銅テープを経由して流れるため、検知器によって高圧ケーブルの故障を特定することができる。

高圧ケーブル故障検知器の定格電流は6.6kVの非接地系で0.5A～4Aの間で整定可能で、定格電流では0.2秒以内で動作する仕様となっている⁵⁾。この時間は非接地系の高圧配電線路でのケーブルの故障表示にあたり、変電所の保護継電器類と時限協調を図るために必要な値である。

2.2.2 変圧器絶縁破壊検知器

高圧変圧器で絶縁破壊が発生した場合、地絡電流は外箱のA種接地を通じて大地に流れる。変圧器タンク内で内部絶縁破壊が発生した場合、変圧器外観で確認することが困難な場合があるほか、非接地抵抗系では地絡電流が小さく変圧器の一次側に設備される高圧カットアウトヒューズが溶断しない場合もあり、故障点探索に時間を要する。この対策として、故障した高圧変圧器を特定できる変圧器絶縁破壊検知器が開発されている。変圧器外箱と接地の間に接地効果を阻害しない程度の低抵抗を挿入し、接地に流れる電流を監視している。高圧変圧器が故障した場合には、地絡電流は外箱と接地を経由して流れるため、高圧変圧器の内部地絡と特定することができる。

変圧器絶縁破壊検知器の定格電流は1Aで、定格電流では0.2秒以内で本体に故障が表示される仕様である⁶⁾。

2.2.3 避雷器切り離し装置

高圧避雷器は高圧配電線路の雷害保護装置として設備されている。直列ギャップ付き避雷器の場合、大電流の雷撃を繰り返し受けると内部のスペーサーに電極材料が飛散付着して絶縁性能が低下する⁷⁾。また、直列ギャップの有無によらず、封緘部の劣化等により吸湿して絶縁性能が低下する場合がある。絶縁性能の低下により、リーク電流が高圧避雷器内部を経由して大地に流れ、地絡となる。この対策として開発された避雷器切り離し装置は、リーク電流の値と流れた時間に基づき自動的に切り離し動作を行うものである。切り離し後は高圧避雷器の

接地側が開放となり、地絡箇所を除去できるため、異常電圧の抑制ができなくなる代わりに当面の配電を確保することができる。また、物理的に切り離された状況になるので、目視確認が容易という特徴がある。切り離しに至る時間と電流の関係を図3に示す^{8) 9)}。抵抗の熱で薬品筒の内圧を上昇させて切り離し動作をさせる動作原理上¹⁰⁾、リーク電流が小さいと反応が遅いという課題を有している。

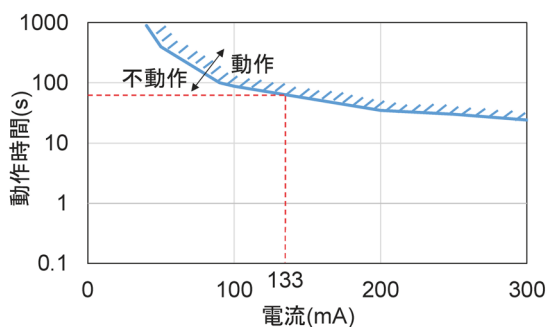


図3 避雷器切り離し装置の動作領域

3. 高圧配電線路における故障点探索の課題

非接地系、接地系を問わず短絡故障では通常負荷より大きな電流が流れるため、機器の溶損や断線のような目視確認可能な損傷が生じる場合が大半であり、徒歩巡視による故障点探索はさほど困難ではない。

一方、非接地系で地絡故障が発生したときの地絡電流は、短絡電流や通常負荷と比べて小さく、また損傷の程度も小さく目視では確認できないため、徒歩巡視による故障点探索は困難である。その対策として、前述の高圧ケーブル故障検知器や変圧器絶縁破壊検知器（以降、これらを各種検知器と表記する）が導入されている。これらの各種検知器は、地絡方向継電器と時限、電流の面で協調が図られており、徒歩巡視による故障点特定で活用されている。そのほかにも高圧配電線路の断線による地絡の場合、縁回り箇所などの充電部露出箇所、周囲に地絡を引き起こし得る金属物や動植物などが溶損または焦げた状態で見つければ、故障点特定の有力な手掛かりになる。

しかしながら、高圧避雷器内部の劣化による地絡が発生した場合、高圧避雷器の外観に変化が認められないことに加え、前述した避雷器切り離し装置の動作条件と地絡方向継電器の動作時限との間で時限協調が図られていないため、故障点探索が困難である。以下、具体的な問題点を述べる。

変電所に施設される地絡用保護継電器の動作時間は一般的に数秒以内で、最小の動作電流が133mAである。一方、図3のように避雷器切り離し装置は動作電流が133mAの場合、動作時間は70秒程度かかる。

図4にこれらの設備の動作電流および動作時間の関係を示す。地絡方向継電器の動作する原因が高圧避雷器の劣化によるリーク電流であり、かつ、電流と時間が図4の赤色ハッチング箇所にある場合、避雷器切り離し装置が動作しないまま、遮断器が開放される。

この状態で高圧配電線路を再加圧すると、再び地絡方向継電器が動作して遮断器が開放される。また、徒歩巡視により故障点を探索しても、避雷器切り離し装置は動作していないので、高圧避雷器本体に明らかな損傷が認められない限り、故障点が特定できない。そのため、配電出来ない状態が長時間にわたり継続し、結果としてダウンタイムが拡大する。

これらの問題点により、従来の避雷器切り離し装置は非接地系統における高圧避雷器本体の劣化表示には適していないといえる。

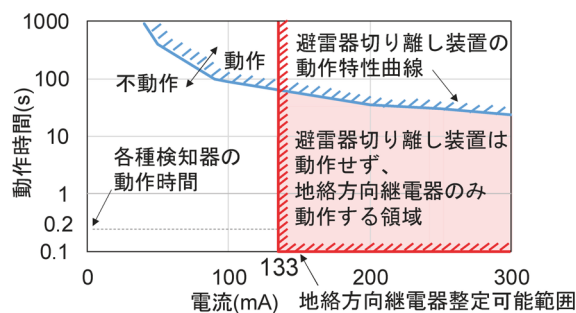


図4 地絡方向継電器・各種検知器・避雷器切り離し装置の動作領域

4. 高圧避雷器劣化表示器の仕様

4.1 動作条件

前章までの検討を踏まえ、高圧避雷器の劣化による地絡がどこで発生したのかを確実に知得できるようにするため、地絡方向継電器と時限協調を図った、高圧避雷器の接地側に取り付ける高圧避雷器劣化表示器（以下、劣化表示器）を提案する。要求仕様を表1にまとめる。

表1 劣化表示器の要求仕様

項目	仕様
動作最小電流	133mA（実効値）
動作開始時間	0.2秒
使用環境	屋外
表示方法	昼夜問わず明瞭に故障発生が分かるように故障時に赤の蛍光色を表示する

この劣化表示器には切り離し機能を搭載していない。搭載に至らなかった理由として、避雷器切り離し装置が

現状の高圧配電線路で動作していないこと、そして、安価かつ簡単に劣化表示器を取り付けられることを目指したためである。

動作最小電流を地絡方向継電器で整定可能な最小値に整合させることにより、検知可能な電流の拡大を図る。動作開始時間は各種検知器と同じ0.2秒にした。使用環境は屋外での長期使用を想定した。故障表示は列車巡視等での視認性を考慮し、高圧カットアウトヒューズホルダーのヒューズ切れ表示と同等の色とし、サイズを大きくした。

図5に、図4の動作領域と表1で示した仕様とを重ねたものを示す。図5より、表1の仕様を有するものが実現できれば、従来の避雷器切り離し装置が動作しない範囲の大半においても、他の各種検知器と同様に、地絡保護継電器の地絡電流検知による遮断器開放よりも早い段階での故障表示ができる。内部劣化により地絡した高圧避雷器を徒歩巡視等で早期に特定することが可能となる。

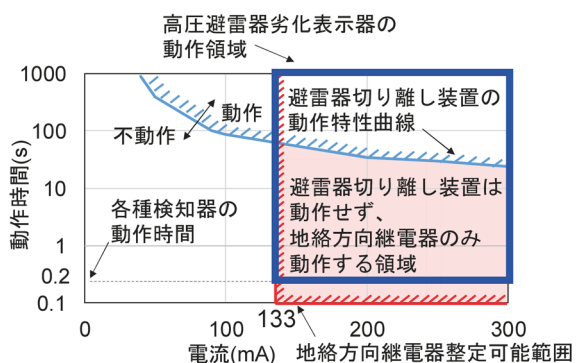


図5 地絡方向継電器・各種検知器・避雷器切り離し装置・劣化表示器の動作領域

4.2 劣化表示器の試作

前節に示した仕様を満たす劣化表示器を試作した。図6は地絡電流を検知して故障表示中を示しており、劣化表示器の表示窓には赤い蛍光色の表示板が掲出されている。比較のため、図6には従来の避雷器切り離し装置を備えた高圧避雷器も並べて示している。劣化表示器は従来の避雷器切り離し装置と同様に、高圧避雷器の二次側(接地側)に取り付けることとしている。

数百A～数kAの雷インパルス電流と微小な地絡電流とを劣化表示器内のマイコンで区別する。この判定ロジックは商用電源周波数に依存するため、今回は後述の現地試験にあわせて、60Hz専用設計で製作した。マイコンが閾値を超えた電流を受け付けると、その後0.2秒の間に交流電流のピーク値の閾値超過をカウントする。12回カウントした場合には、劣化表示器内のモーターに回転指令を出し、赤の蛍光色を表示窓に掲出する。これらの機能を可能な限り長寿命でコンパクトに実現するため、電源にリチウム一次電池を選定し、最長20年の動作を可能とした。

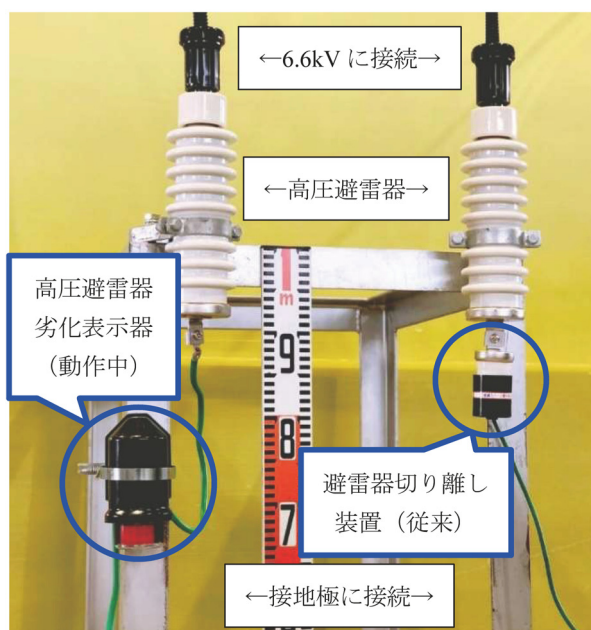


図6 劣化表示器および避雷器切り離し装置の外観

単体試験として、60Hzで実効値133mAの試験電流を劣化表示器に注入し、正常に動作することを確認した。

5. 劣化表示器の試験結果

5.1 所内試験

鉄道総研所内で劣化表示器の動作検証試験を実施した。試験回路を図7に示す。劣化表示器が60Hz専用のため、周波数変換装置(FC)を使用して60Hzの単相6.6kVを発生させ、高圧変圧器を2台組み合わせて非接地高圧電源を模擬した。一般的な高圧配電線路の模擬として、こう長が約21km、うち高圧ケーブル区間が約1kmの単相2線回路を模擬し、地絡抵抗を模擬した R_{EF} に抵抗器(3k Ω および23.5k Ω)を用いた条件と、抵抗器の代わりに塩と砥の粉を3%ずつ混ぜた水を高圧避雷器内に注入して作成した劣化模擬高圧避雷器2種類(絶縁抵抗計による抵抗測定値16k Ω と36k Ω)を用いて計4通りの条件で試験を行った。

結果の例として、 R_{EF} を劣化模擬高圧避雷器とした場

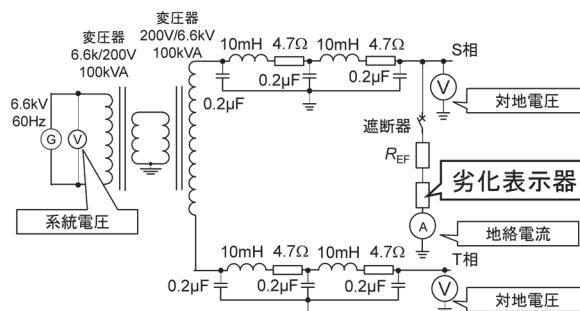
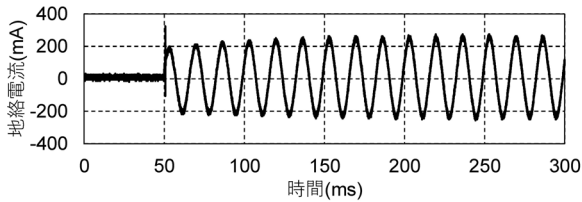


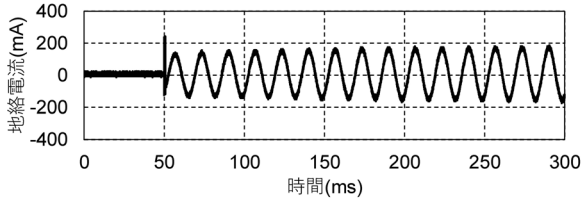
図7 所内試験回路

合の地絡電流波形を図8に示す。地絡電流は正弦波に近い波形となった。文献11によれば、地絡点における大気中ギャップ長さが短い場合に零相電流（≒地絡電流）波形は正弦波状となり、ギャップ長さが長くなるにつれて三角波や針状波形となると報告されていることから、今回の劣化模擬高圧避雷器内部ではアーク放電が発生していなかったと考えられる。図8(a)の絶縁抵抗16kΩの劣化模擬高圧避雷器では、地絡電流の実効値は181mAとなり、劣化表示器が動作した。一方、図8(b)の絶縁抵抗36kΩの劣化模擬高圧避雷器では、地絡電流の実効値は123mAで、劣化表示器は動作しなかった。

所内試験の結果を図9にまとめる。劣化表示器は表1の仕様で定めた動作最小電流である133mA以上の地絡電流に対し、動作することが分かる。



(a) 高圧避雷器絶縁抵抗16kΩの場合の地絡電流波形



(b) 高圧避雷器絶縁抵抗36kΩの場合の地絡電流波形

図8 劣化模擬高圧避雷器を用いた所内地絡試験結果

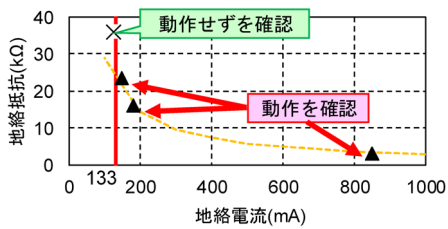


図9 所内試験による劣化表示器の動作結果

5.2 現地試験

劣化表示器の動作を確認するため、営業線の非接地系高圧配電線路にて人工故障試験を実施した。この構成を図10に示す。送り出しの変電所は直流変電所であり、その中に併設された配電用変圧器で特別高圧を高圧6.6kVに降圧し、絶縁変圧器で他回線と対地電位を分離し、高圧配電線路に配電している。試験区間は多くが明かり区間であり、絶縁電線を使用しているが、一部のトンネルや変電所からの引き出し箇所には高圧ケーブルを使用している。

試験ではX変電所からY変電所に向かい配電した。Y変電所構内において、主回路のS相を人為的に一線地絡させる試験回路を構成し、その回路中に地絡抵抗 R_{EF} または劣化模擬高圧避雷器と、供試体としての劣化表示器を接続した。試験は R_{EF} を3kΩ, 18.8kΩ, 23.5kΩ, として絶縁抵抗計で10kΩと示された劣化模擬高圧避雷器の計4通りの条件で行った。

地絡電流はY変電所構内の地絡点で、また系統電圧、回線電流および零相電圧はX変電所の配電盤より、それぞれ測定・取得した。なお、X変電所では零相電圧の実効値が1800V以上で軽故障(64L)、3600V以上で重故障(64D)として地絡電圧継電器が動作する。また、64Dを検知した場合には、0.2秒後に遮断器を開放するように整定されている。

各条件の試験結果を図11に示す。劣化表示器は地絡電圧継電器の動作条件よりも低い零相電圧となる条件(大きな地絡抵抗)でも動作することを確認した。したがって、今回開発した劣化表示器を用いた高圧配電線路の保護システムは、従来の避雷器切り離し装置では検知

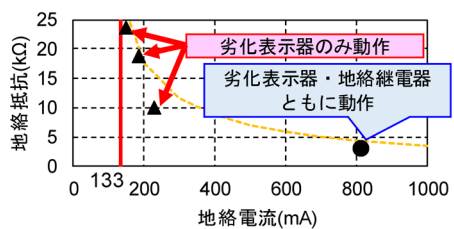


図11 現地試験による地絡電圧継電器と劣化表示器の動作結果

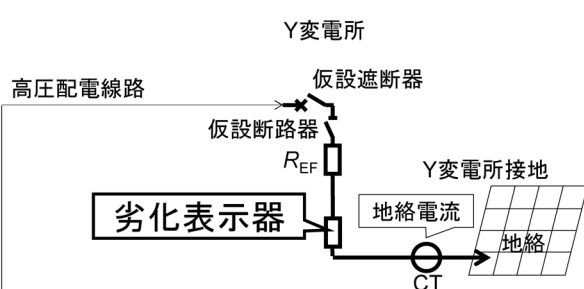
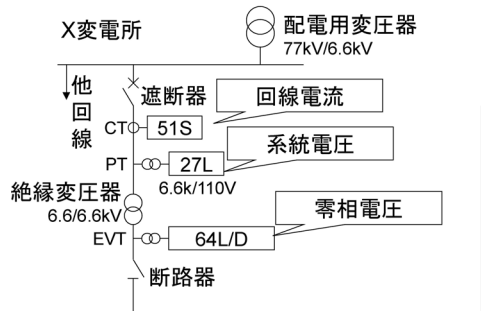


図10 現地試験回路

できない高圧避雷器の絶縁劣化を、継電器動作よりも早い段階で検出できる。

6. 実運用における使用例について

劣化表示器を用いた高圧配電線路保護システムは前述の様にリチウム一次電池を使用しているため、想定寿命は20年であり、利用者側で残寿命管理が必要である。

劣化表示器は従来の避雷器切り離し装置と異なり、故障した高圧避雷器を電路から切り離す機能はない。このため、仮に高圧避雷器が故障し劣化表示器が動作しても、接地線としての機能は維持されている。このことから、劣化表示器は必ずしも個々の高圧避雷器直下に取り付ける必要はなく、同一位置に設けられた複数の高圧避雷器をまとめて1個の劣化表示器で劣化監視することもできる。そのため、図12のように劣化表示器を接地抵抗測定用切込み部に割り込むように設置すれば、地絡過電圧または方向継電器が動作した際の故障点探索を容易にできる。

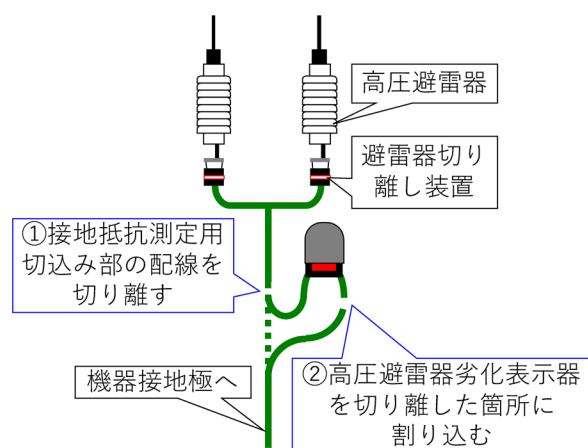


図12 劣化表示器の使用例

7. まとめ

本論文では、非接地系高圧配電線路の保護継電器と避雷器切り離し装置との時限協調を整理し、高圧避雷器劣化故障による地絡電流では避雷器切り離し装置が動作しないことを示した。時限協調を図った状態で高圧避雷器の故障検知を行うためには、地絡電流は133mA、動作

時間は0.2秒の検出感度が必要であることを示した。

そして、現状の保護システムにおいて高圧避雷器の劣化を検知・表示することができる劣化表示器を提案し、現地試験等で、変電所の地絡過電圧または方向継電器と時限協調を図った状態で高圧避雷器の故障検知が可能であることを確認した。

謝 辞

本研究において、劣化表示器の試作にご協力いただいた音羽電機工業株式会社の各位、現地試験にご協力いただいた西日本旅客鉄道株式会社電気部電気技術室および福知山支社の各位に謝意を示す。

文 献

- 1) 電気鉄道ハンドブック編集委員会：鉄道電気ハンドブック，コロナ社，p.594，2007
- 2) 一般社団法人日本鉄道電気技術協会：柱上変圧器内部絶縁破壊，鉄道と電気技術，Vol.21，No.3，p.55，2010
- 3) 岡田 肇：配電線路避雷器設備の一考察，電力と鉄道，Vol.26，No.11，pp.14-16，1976
- 4) 一般社団法人日本鉄道電気技術協会：配電・電灯電力一般，pp.69-71，2017
- 5) 株式会社三輝製作所：高圧ケーブル故障検知器，http://www.sankiss.co.jp/matine_0013.htm，（参照日：2020年4月22日）
- 6) 株式会社三輝製作所：絶縁破壊検知器，http://www.sankiss.co.jp/matine_0014.htm，（参照日：2020年4月22日）
- 7) 大坪昌久，吉玉拓，橋本修輔，贅田寛，上島征行：配電用直列ギャップ付避雷器の繰返し動作による特性変化，電気学会論文誌B，Vol.113，No.4，pp.390-396，1993
- 8) 音羽電機工業株式会社：総合カタログ，p.201，2019
- 9) 新井浩一：高圧配電用避雷器分離装置について，電力と鉄道，Vol.26，No.6，pp.19-21，1976
- 10) 一般社団法人日本鉄道電気技術協会：配電線路設備，p.154，2017
- 11) 渡邊誠，小丹枝和二，中村脩，栗岡英明，福居助憲，辻克典：配電線地絡故障時の波形と原因判別法，電気学会論文誌B，Vol.115，No.1，pp.18-23，1995