

# サージ検知形交流き電回路用故障点標定装置の開発

森本 大観\*    安喰 浩司\*\*    森田 岳\*  
 兎束 哲夫\*    吉井 剣\*    立和名 康平\*\*\*

## Development of Surge Detection Type Fault Locating System for AC Feeding Circuits

Hiroaki MORIMOTO    Kohji AJIKI    Gaku MORITA  
 Tetsuo UZUKA    Tsurugi YOSHII    Kohei TACHIWANA

A precise fault locator helps immediate resumption of normal train operation services when an electrical trouble occurs on contact wire system. However, sometimes it takes a considerable time to detect the substantial fault point at the site, because conventional fault locators sometimes give a location error of one kilometer or more. We have developed a new type of fault locator using the arrival time difference of a surge voltage at each end of the feeder section. This paper describes the development process of the new system from the basic principle to the location result of an actual ground fault observed during the long-term field test.

キーワード：故障点標定装置，ロケータ，サージ，伝搬速度

### 1. はじめに

交流き電回路では、電車線路における地絡故障および短絡故障箇所を特定し復旧を迅速に行うために、故障点標定装置(ロケータ)により故障点を標定している<sup>1)</sup>。しかし、現在使用されている故障点標定装置による標定値の誤差が最大±1km程度に達する場合がある他、故障種別によっては原理的に標定不可能または誤標定となる場合が存在する。このため、故障点の探索と復旧に時間を要することがあり、標定精度の向上が求められている。

一方、電力会社等の一般送電線において、短絡・地絡故障時に電線路に発生し伝搬するサージ電圧を、故障点を挟む2箇所の電気所(変電所等)で検知し、その時間差から故障点を標定する手法が存在している。この手法はケーブル送電系統に適用例があり<sup>2)</sup>、その標定精度は数十メートルといわれている。

そこで、交流き電回路における故障点標定装置の精度向上を目標として、故障点において発生するサージ電圧を検知することにより故障点を標定する、サージ検知形故障点標定方式の適用検討を行った。

### 2. 交流き電回路における従来の故障点標定方式とその問題点

#### 2.1 リアクタンス計測方式(主にBTき電回路用)

在来線で用いられている交流BTき電回路では、がいし閃絡や地絡が発生した場合、閃絡導線、放電間隙装置(S状ホーン)、保護地線(FW)、電力用保安器等の設備により、トロリ線(T)と負き電線(NF)の金属短絡故障(T-NF短絡)に移行させることを基本としている。図1に示すように、T-NF短絡回路を変電所から見たときのリアクタンス(インピーダンスの虚数分)は、故障点抵抗の有無に関わらず距離に比例する。したがってリアクタンスを距離に換算することで故障点位置を標定することができる。この原理に基づく故障点標定装置をリアクタンス計測方式故障点標定装置と呼んでいる<sup>1)</sup>。

ただし、トロリ線・レール間短絡(T-R短絡：車両故障や移動式クレーンによる踏切支障等)の場合、図2に示すように故障点とBTセクションの位置関係で故障電流経路が変わり、BTの飽和を無視するとリアクタンスはBT・吸上線間で階段状の値となる。また、電圧降下対策等のためNFに直列コンデンサが挿入されている場合は、直列コンデンサ以遠でそのオーム数だけリアクタンスが減少する。更に、故障電流が大きい場合は直列コンデンサに並列に設けられている保護放電装置が動作してコンデンサが自動で短絡除去され、リアクタンスが動的に増加する場合がある。以上より、実際のBTき電回路では、異なる故障箇所が同一のリアクタンス値を示す場

\* 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)

\*\*\* 九州旅客鉄道株式会社

特集：電力技術

合が常に存在する。これはリアクタンス計測方式故障点標定装置の標定原理と整合していないため、当該装置による自動標定だけでは正確な標定結果を得難いのが実情である。

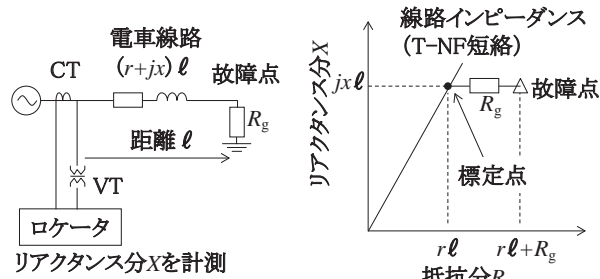


図1 リアクタンス計測方式故障点標定装置の原理

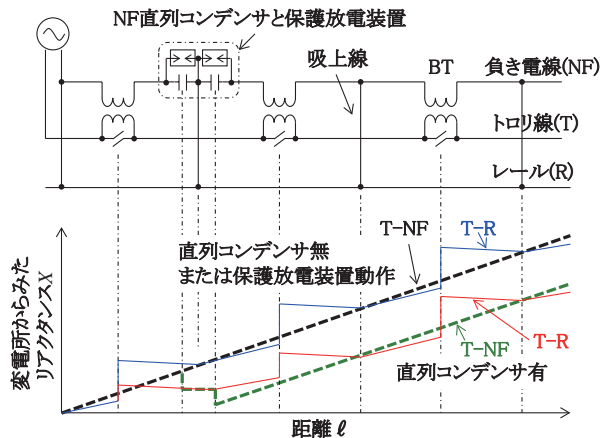


図2 実際のBTき電回路の線路インピーダンス

2.2 吸上電流比方式（主にATき電回路用）

ATき電回路では、トロリ線（T）とき電線（F）の短絡回路（T-F短絡）のインピーダンスは故障点までの距離に比例する。しかし、実際の故障の多くを占めるのは、がいし閃絡や飛来物によるトロリ線またはき電線の地絡故障（T地絡・F地絡）およびそれらを閃絡導線やS状ホーンにより保護線（PW）への金属短絡故障に移行させたT-PW短絡・F-PW短絡と、車両故障等のT-R短絡である。

T-F短絡を除く故障回路インピーダンスは、距離と直線的な比例関係ではなく概ね上に凸の曲線になる。よって、リアクタンス計測方式では誤差が大きい。

一方、T-R短絡、T-PW短絡、F-PW短絡では、故障点を挟むAT（単巻変圧器）の中性線に流れる電流（AT吸上電流）が、それぞれのATから故障点までの距離に概ね反比例し、AT吸上電流値の合計に対する起点側AT吸上電流値の占める割合が故障点までの距離と概ね直線的な関係になる。これを利用し、故障点を挟む両側のAT吸上電流の比から故障点を算出する吸上電流比方式故障点標定装置<sup>1)</sup>が適用されている（図3）。

吸上電流比方式の標定誤差は1km以内と言われている。しかし、最終的に地絡故障が継続する事象（閃絡導

線方式に於いては車両故障とがいし閃絡のいずれでもない故障、S状ホーン方式ではS状ホーンが何らかの理由で放電しない場合）では1kmを超える標定誤差が生じることもある。また、T-F短絡故障の場合にはAT吸上電流が僅かしか流れないため、吸上電流比方式では標定することができない。しかし、T-F短絡故障の場合にそれを判別して標定出力を抑止する機能仕様を標定装置自身が持っていないため、無意味な標定値を出力する場合があります、その結果、故障点の特定に時間を要す場合がある。

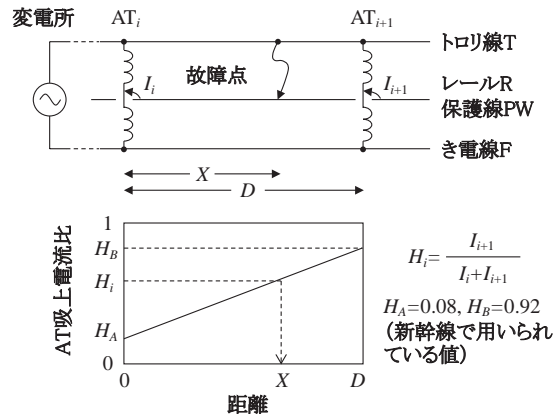


図3 AT吸上電流比方式故障点標定装置の原理

3. サージ検知形故障点標定方式

交流電車線路ではトロリ線やき電線に20～25kVの高電圧が加圧されているので、故障が生じた時は急峻な電位変化が生じ、サージ（進行波）電圧として故障点を挟む両変電ポストへ伝搬していく。サージの伝搬速度が既知であれば、図4に示すように区間両端の変電ポストにそれぞれサージ電圧を検出する装置を置き、サージ電圧到達時刻の差から故障点を標定することができる。以下ではこの方式を「サージ検知形故障点標定方式」、この原理に基づく故障点標定装置を「サージ検知形ロケータ」と呼ぶこととする。

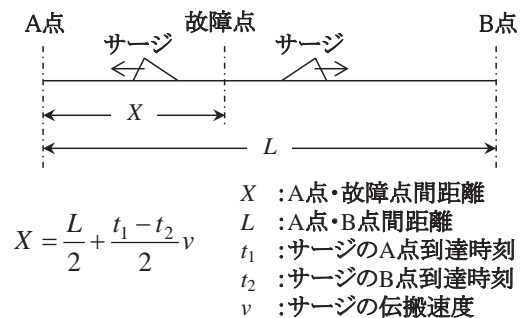


図4 サージ検知形故障点標定方式

本方式をき電回路に適用する利点の一つは、サージ電圧は故障モードに関わらず電線路の最短経路を伝搬してくるため、距離とサージ電圧の伝搬時間の比例関係が比

較的崩れにくいという点である。反面、これまでに適用実績のある電力会社等のケーブル回線<sup>2)</sup>と異なり、き電回路は単線・複線、明かり区間(盛土, 高架)・トンネル区間等の様々な線路条件(電車線装柱)が混在する回路であり、また線路の途中にBTやAT等の機器が点在するため、サージ電圧の反射および減衰、区間内での伝搬速度の相違などに注意する必要がある。

#### 4. 電車線地絡故障時のサージ現象

##### 4.1 サージ電圧伝搬現象の基礎測定

サージ検知形ロケータの適用検討には、変電所およびき電区分所(SP)でサージの検知が可能であることの確認が必要である。そこで雷インパルス発生器を用いて変電所より雷インパルス電圧を回路に注入し、変電所とSPにおいて主回路の電位を周波数特性に優れた抵抗分圧器で観測した。

その結果、SPへ到達した波形は変電所での印加波形に対して減衰し立ち上がりも緩やかになるものの、BTき電区間・ATき電区間ともT相の対地電位からサージ到着点の判別が十分可能であることが判明した。また、同時に既設の計器用変圧器(VT)の出力を観測したところ、変電所・SPとも波形は抵抗分圧器で得たT相電位と比較すると大きく変化していたが、サージ到着点の判別は十分可能であった。よって、既設VT出力をサージ検知形ロケータの入力として利用できる可能性が高いと考えられる。一方、SPのN相では到達したサージ電圧の減衰や波形変化が著しく、サージ到着点の判別は困難であった。

##### 4.2 人工故障試験によるサージ電圧波形の測定

サージ検知形ロケータの適用検討には、実際の故障発生時に生じるサージ電圧を把握することが必要であった。このため、き電回路で人工故障試験等を実施し、故障発生時に生じるサージ電圧の波形を測定した<sup>3)</sup>。

試験実施箇所は明かり区間のみ18.843kmのBTき電区間である。故障点はSPに設け、故障回路は図5に示すように、コンクリート柱への地絡模擬を意図して1kΩの抵抗を介する地絡故障とし、S状ホーン方式を模擬するため保安器(電力用2号)を用いた。実際の地絡故障は鳥や飛来物の接触で起きることが多く、その際の故障時の放電は交流電圧波形の波高値付近で発生すると推測され

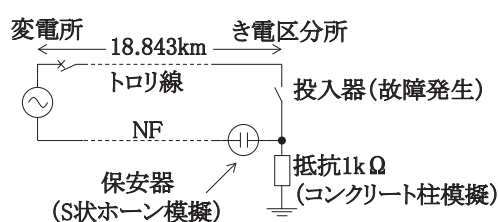


図5 人工故障試験回路(故障点サージ波形測定)

る。今回の試験ではそれを模擬するため、故障発生用投入器として大気中電極がごく低速(0.3m/s程度)で接近するものを使用し、交流電圧の波高値付近で放電して故障が発生するようにした。

故障点で測定したサージ電圧波形(対地)を図6に示す。トロッコ線電圧は交流電圧波高値(31kV)付近で放電し、波高値から急峻にほぼ0Vに変化しており、波高値から約0Vに変化するのに要した時間は0.24μsであった。

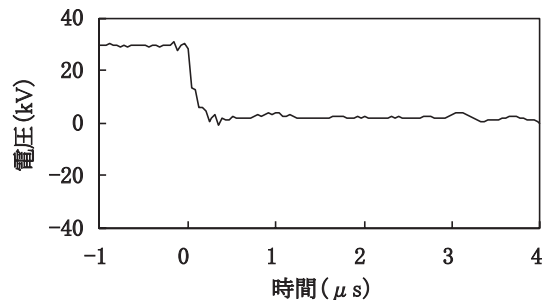


図6 故障点のサージ電圧波形(トロッコ線・大地間)

##### 4.3 サージ伝搬速度の測定

サージ検知形ロケータにおける標定値の精度は、その原理上、サージ電圧伝搬速度に強く影響される。そこで、前述の試験測定時に併せてサージ伝搬速度を測定した<sup>3)4)</sup>。

サージ伝搬速度は変電所・SP間の距離をサージ電圧到達時間差(伝搬時間)で除して求められる。人工故障試験時において9回の平均値を求めた結果、伝搬速度は263.8m/μsであった。また、同区間で雷インパルス発生器を用いて変電所より雷インパルス電圧を回路に注入し、同様の手順で伝搬速度268.9m/μsが得られた。

伝搬速度は線路条件(電車線装柱)により異なると考えられる。よって、サージ検知形ロケータに正確な標定を期するためには、伝搬速度を測定することが望ましい。

#### 5. 故障点自動標定手法

##### 5.1 サージ到達時刻検出手法

サージ検知形ロケータでは、サージ到達時刻を正確に捉えることが標定精度確保のため重要である。サージ波形は、発生点である故障点では図6に示したように非常に急峻な立ち上がりを示すが、伝搬とともに緩やかな立ち上がりとなる。このため、サージ到達時刻を単純に波形の電圧レベルのみで捉えると、図7のように2箇所ですらサージ到達時刻の評価基準に相違が生じ、十分な標定精度が得られない。

そこで正確なサージ到達時刻であるサージ波形の立ち上がり点を自動で求める手法を開発した<sup>5)</sup>。図8はBTき電区間で人工故障試験を行い、故障点で発生したサージ電圧が12.7kmの距離を経て変電所に到達した波形(VT二次側電圧)および当該波形からサージ電圧の正確な到達

特集：電力技術

達時刻，すなわちサージ電圧波形が0Vに向かいだす変化点を求める手法を示したものである。以下にサージ到達時刻を求める手順を記す。

- ①VT二次側サージ電圧波形の差分値波形を作る。差分波形とすることで変化点が求めやすくなる。
- ②差分波形におけるサージ到達前のデータ(トリガ点前のデータ)の最大値(ノイズレベル最大)を求める。
- ③ノイズレベル最大値と差分波形の交点を求める(ポイント1)。
- ④差分波形の最初の極大値を求める(ポイント2)。
- ⑤ポイント1とポイント2を結ぶ直線が，0レベルと交わる点をサージ到達点とする。

本手法により，電圧レベル検出による一般的なサージ電圧到達時刻検出よりも検出精度が向上すると考える。

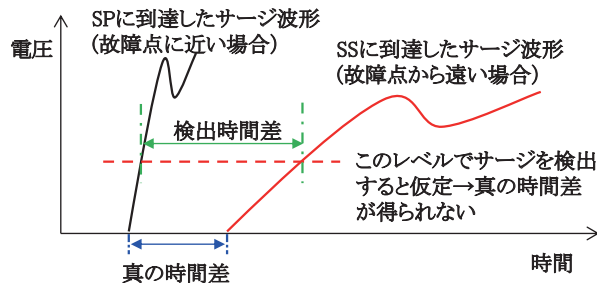


図7 サージ到達時間差の誤差要因

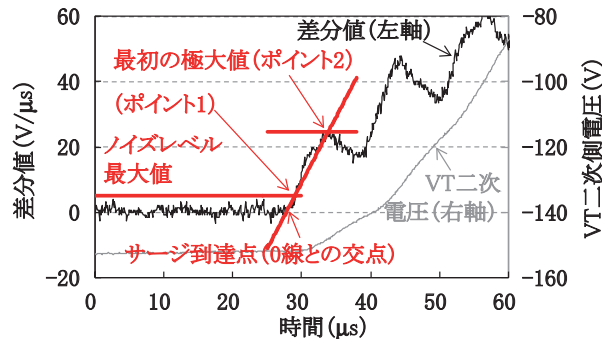


図8 差分波形によるサージ到達時刻検出手法

5.2 初き電時における故障検出手法

2箇所の変電所におけるサージ電圧到達時間差による故障点標定方式は，き電回路が通常の加圧運転状態に発生する故障が対象である。何らかの原因でき電回路が予め地絡・短絡回路となっている状態でき電開始された場合，故障点でのサージ電圧の発生はない。このため初き電時の故障をサージ電圧到達時間差で標定することはできない。

このような初き電時故障を標定する手法としては，故障点からのサージの電圧の反射を利用する方法がある。一般に，サージ電圧が伝送線の端で反射される場合，短絡端では反射波の極性が反転し，開放端では同極性になるという性質がある。図9および図10に示すように，変電所でき電用遮断器の投入時に発生したサージ電圧

(仮に正極性とする)は $t$ 秒後に故障点に到達し，負極性の反射波が生じて変電所に向かって伝搬し $2t$ 秒後に変電所に到達する。到着した負極性のサージ電圧は，変電所が見かけ上開放端のため負極性のまま反射波となり，以後同様にサージ電圧は反射と極性反転を繰り返しながら区間内を往復する。変電所でサージ電圧を観察すると，負極性の反射波到達時は電圧が負方向に転じ，正極性反射波が到達すると電圧が正方向に転じるので，変電所のサージ電圧波形の極大値と極小値間の時間がサージ往復時間 $2t$ に相当し，それに伝搬速度を乗じた値の1/2が標定距離となる。

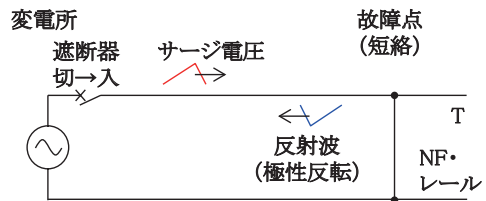


図9 初き電故障時のサージ伝搬

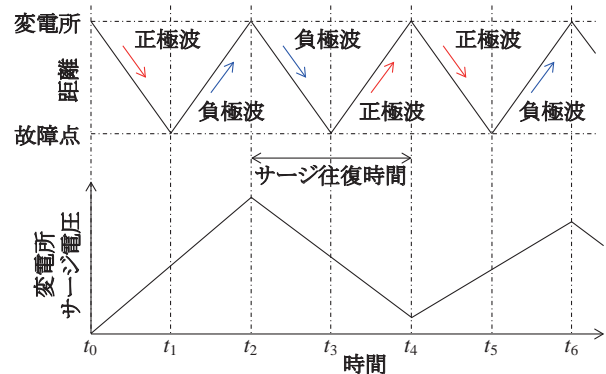


図10 初き電故障時のサージ伝搬

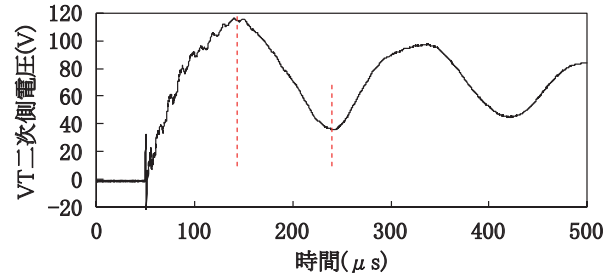


図11 変電所遮断器投入時VT二次側サージ電圧波形(初き電故障条件での人工故障試験)

ただし，サージ電圧検知に既設の計器用変圧器(VT)を用いると，VT自身および二次側回路の固有振動数の影響を受けてサージ電圧波形が変化するため，正確なサージ往復時間を得ることは難しい。初き電故障条件での人工故障試験における，変電所遮断器投入時のVT二次側サージ電圧波形を図11に示すが，この波形より求めた標定距離は実際と一致しなかった。したがってロケータ入力に既設VTを用いる場合には，サージ検知形ロケータに従来同様のリアクタンス計測方式による標定機

能を付加し、初き電故障に対してはリアクタンス計測方式で標定するのが現実的であると考える。

## 6. サージ検知形ロケータの試作

これまでの成果を踏まえ、サージ検知形ロケータの波形処理装置および自動標定プログラムを試作した<sup>3)</sup>。

図12に全体システム構成を示す。本システムでは、変電所とSPに設置した波形処理装置によりサージ電圧波形を記録し、標定演算装置の自動標定プログラムにより記録波形を解析し、サージ電圧到達時刻を特定するとともに、その到達時間差から故障点を標定する。試作したサージ検知形ロケータの外観を図13に示す。試作器の分解能は12ビット、サンプリング周波数は10MHzで4チャンネルの入力要素を持ち、検知・記録された波形データにGPS時計で得られる絶対時刻を付している。

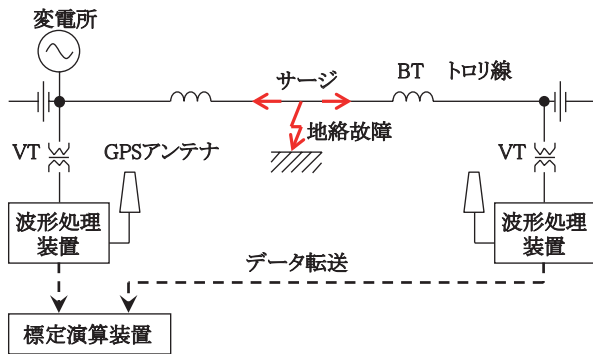


図12 サージ検知形ロケータシステム



図13 試作サージ検知形ロケータ（波形処理装置）

## 7. 現地試験による標定精度検証

### 7.1 雷インパルス電圧印加試験および人工故障試験

標定精度を検証するため、現地において故障模擬および実故障による標定精度検証試験を実施した<sup>3)4)</sup>。試験は、トロッコ線への雷インパルス電圧（約20kV）印加による標定試験をATき電区間（図14）およびBTき電区間（図15）で実施し、実電源人工故障による標定試験をBTき電区間（図15）のみで実施した。なお、AT・BTの両試験き電区間ともにその全長は明かり区間である。

試作ロケータによる検知波形例（VT二次側電圧）を

図16および図17に、また標定結果を表1に示す。表1の内、人工故障試験による標定結果では、波形からサージ電圧到達時刻を手動で読み取った手動標定値よりも自動標定プログラムによる値の方が高精度であった。一方、雷インパルス電圧印加による標定結果では、手動標定値よりも自動標定値の誤差が大きい結果となった。これは人工故障で発生するサージ電圧が図6に示したように非常に急峻な変化（150kV/ $\mu$ s）であるのに対し、雷インパルス電圧の変化は緩やかな変化（20kV/ $\mu$ s）であったことが影響している可能性がある。すなわちサージ電圧到達時刻であるサージ電圧の立ち上がり点を自動で求める方法（図8）において、波形が急峻な方が誤差が発生しにくいことに起因していると考えられる。また実際の故障で発生するサージ電圧波形は人工故障でのサージ電圧波形に近いので、実故障での標定誤差は、人工故障試験での標定結果より最大で100m～200m程度、平均で50m程度と考えられる。以上より、人工故障試験波形でのサージ電圧到達時刻の自動検出精度は十分であったと言える。

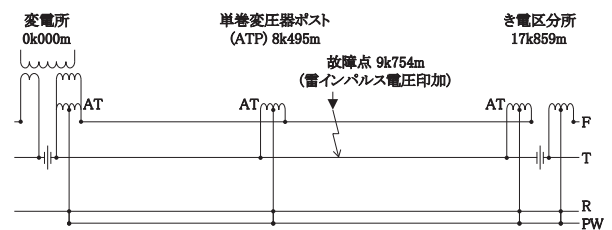


図14 試験系統概略図（ATき電区間）

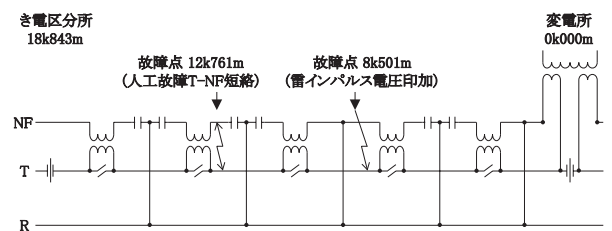


図15 試験系統概略図（BTき電区間）

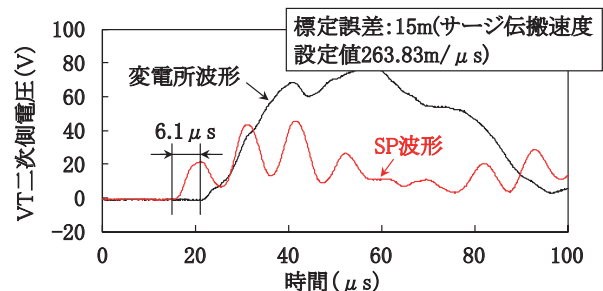


図16 雷インパルス電圧による標定試験の波形例（ATき電区間）

表1 標定試験結果

	BT 区間 (VT 二次側電圧使用)		人工故障		AT 区間 (VT 二次側電圧使用)	
	雷インパルス電圧印加 手動標定	自動標定	手動標定	自動標定	雷インパルス電圧印加 手動標定	自動標定
試験回数	14 回	10 回	4 回	4 回	14 回	13 回
最大誤差	122m	327m	110m	87m	99m	310m
最小誤差	3m	167m	70m	7m	7m	165m
平均誤差	30m	229m	87m	27m	41m	242m
標定値の中	159m	133m	40m	107m	172m	147m

標定対象区間長 18.843km  
 変電所・故障点間距離 12.671km  
 サージ伝搬速度 263.83m/μs

標定対象区間長 17.859km  
 変電所・故障点間距離 9.754km  
 サージ伝搬速度 263.83m/μs

標定値の中：標定値のバラツキの中 (標定値の最大値と最小値の差)

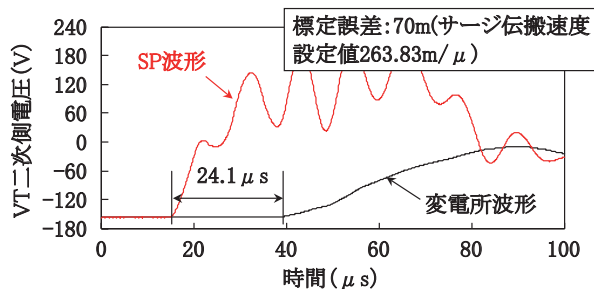


図17 人工故障による標定試験の波形例(き電中の故障, BT き電区間)

7.2 長期仮設試験での標定結果

試作ロケータを BT き電区間および AT き電区間の変電所とき電区分所にそれぞれ1組ずつ仮設し運転状態とした。仮設期間は約7カ月間で、その間に AT き電区間において1回の実故障データを得ることができた。故障原因はヘビによる地絡であった。そのときの VT 二次側サージ電圧波形は図18であり、図6の BT き電区間における人工故障試験時波形と同様、交流電圧の波高値付近で放電が生じ 0V 側に急峻に変化していた。標定結果は表2の通りであり、標定誤差 31m が得られた。

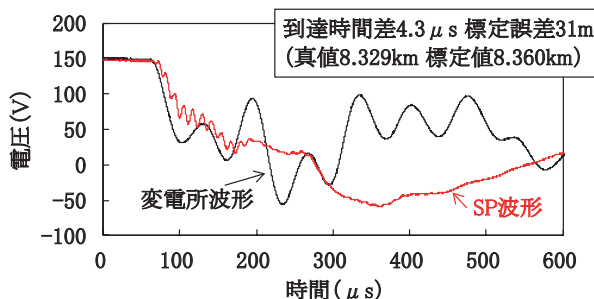


図18 地絡故障検知波形 (AT き電区間・実故障, VT 二次側電圧)

8. まとめ

交流き電回路における故障点標定装置の精度向上を目標として、サージ検知形故障点標定方式の開発を行っ

表2 実地絡故障標定結果 (AT 区間)

項目	測定値	摘要
サージ電圧到達時間差	4.3 μs	自動標定プログラム
標定値	8.360km	サージ伝搬速度設定値 263.83m/μs
真値	8.329km	
標定誤差	31m	

た。その結果、従来最大 1km 程度であった標定誤差が、本方式では 100m ~ 200m 程度まで改善可能であることを、現地試験等で確認した。

本方式の利点は、BT き電区間にあつては標定精度が BT や NF コンデンサ等の機器に影響されないこと、AT き電区間にあつては T-F 短絡故障も標定可能になることである。

ただし現時点では実際の故障データが少ないので、今後試験的に導入し標定精度および信頼性等の確認を行うことが望まれる。また、単線と複線、明かり区間とトンネル区間等、サージ伝搬速度が異なる線路が混在するときの補正処理、波形処理装置の設置間隔と標定精度の関係、通信手段の整備などが、実運用に際しての課題になると考えられる。

文献

- 1) 電気鉄道ハンドブック編集委員会:電気鉄道ハンドブック, コロナ社, p.555, 2004
- 2) 相原康彦, 浅川正人, 矢代誠一, 大井学, 鈴木聡, 天野一夫: 超高压電力ケーブル用故障点標定システム, フジクラ技報, No.99, 2000
- 3) 安喰浩司, 他: 交流電車線路人工故障によるサージ検知形ロケータの標定試験, 平成 21 年電気学会産業応用部門大会, No.3-33, pp.III-269-272, 2009
- 4) 安喰浩司, 他: 交流電車線路人工故障によるサージ検知方式ロケータの標定基礎試験, 平成 20 年電気学会産業応用部門大会, No.3-67, pp.III-341-342, 2008
- 5) 公開特許公報, 特開 2011-196819