

サージ検知による交流き電回路用故障点標定装置の開発

電力技術研究部 き電研究室
副主任研究員 森本 大観

1. はじめに

交流き電回路では、電車線路における地絡・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。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、電力会社等のケーブル送電系統において、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）で測定・検知し、サージ電圧の到達時刻の差から故障点を標定する手法（サージ検知形故障点標定方式）が存在している。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、サージ検知形故障点標定方式の適用検討を行った。

2. 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1に示す原理で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。

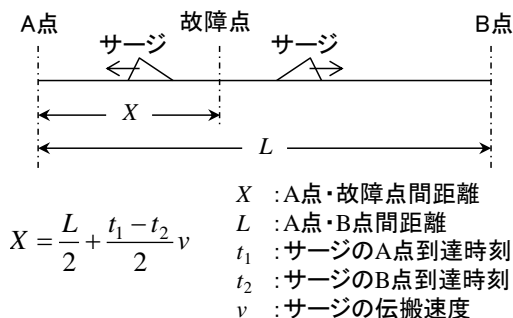


図1 サージ検知形故障点標定方式

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すると考えられるため、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ケーブル送電系統と異なり、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）が混在する不均一な回路であり、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。

3. 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（T相、NF、PW等）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比べると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とも抵抗分圧器で得たT相電位と比較すると波形自体は大きく変化するものの、サージ到着点の判別は十分可能であった。

4. 実電圧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る。このため、明かり区間のみ約19kmのBTき電区間で実電圧人工故障試験を実施し、故障発生時に生じるサージ電圧波形を測定した。

実際の地絡故障は動植物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通常の特別高圧真空遮断器等に代えて大気中電極がごく低速（0.3m/s程度）で接近する構造のものを使用し、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2に示す。トロリ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。

ただし、き電回路が最初から地絡・短絡回路となっている状態でき電開始された場合、故障点ではサージ電圧が発生しない。このため、変電所き電用遮断器の投入サージ電圧が短絡点で反射されて再び変電所に帰着するまでのサージ往復時間を標定に利用することを検討したが、試行例では既設の計器用変圧器（VT）固有振動の影響を受けてサージ往復時間が正確に求められず、標定ができなかった。よって、初き電故障に対しては別の標定原理を併用する必要がある。

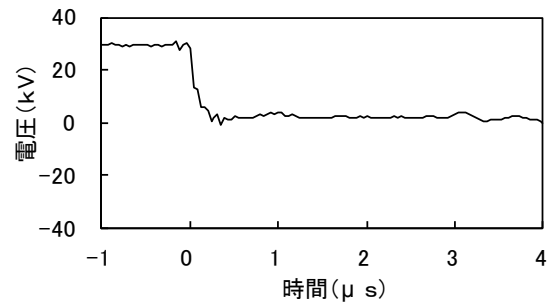


図2 故障点のサージ電圧波形
（トロリ線・大地間）

5. サージ到達時刻検出手法

サージ検知形ロケータで十分な標定精度を得るためには、サージ到達時刻を正確に特定することが必要である。サージ波形は、発生点である故障点では図2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3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。

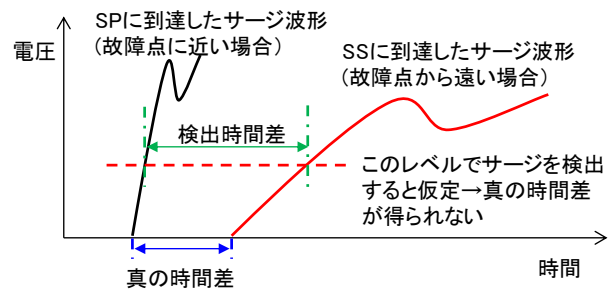


図3 サージ到達時間差の誤差要因

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、VT二次側サージ電圧波形の差分値（離散微分値）波形のノイズレベルと最初の極大値に基づいて自動で求める手法を開発した（図4）。

6. サージ検知形ロケータの試作と標定精度検証

試作したサージ検知形ロケータシステムの構成を図5に、波形処理装置の外観を図6に示す。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するとともにGPS時計で得られる絶対時刻を付す。サンプリング周波数は10MHz、時刻同期精度は $0.1\mu\text{s}$ である。次に、標定演算装置の自動標定プログラムにより変電所とSPの記録波形を解析し、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。

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。試験は、トロリ線への雷インパルス電圧試験印加による標定試験をBTき電区間(図7)およびATき電区間(図8)で実施し、実電源人工故障による標定試験をBTき電区間で実施した。なお、両試験き電区間ともにその全長が明かり区間である。

試作ロケータが検知した波形の例(VT二次側サージ電圧)を図9および図10に、また標定結果を表1および表2に示す。

BTき電区間(図7)では、表1に示すように雷インパルス電圧印加による標定結果よりも人工故障試験による標定結果の方が高精度であった。これは、人工故障で発生するサージ電圧の傾き(変化率)が図2に示したように非常に急峻であった($150\text{kV}/\mu\text{s}$)のに対し、雷インパルス電圧の傾きが若干緩やかであった($20\text{kV}/\mu\text{s}$)ことが影響している可能性がある。

ATき電区間(図8)においては人工故障試験による検証は行わなかったが、雷インパルス電圧印加と人工故障におけるサージ電圧波形の傾向相違はATき電区間においてもほぼ同様と考えられる。よって、BTき電区間・ATき電区間ともに、実故障での標定誤差は最大100m~200m程度となることを見込まれる。

次に、試作ロケータを現地に約7カ月間仮設したところ、その間にATき電区間において1回の実故障(ヘビによる地絡)データを得ることができた。そのとき試作ロケータが検知したVT二次側サージ電圧波形は図11であり、前掲のBTき電区間人工故障試験における測定例と同様、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。標定誤差は31mであった。

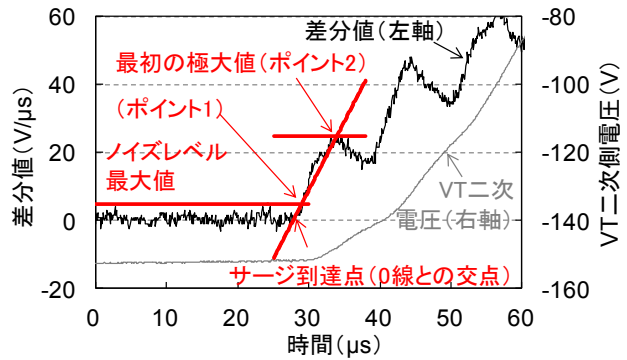


図4 差分波形によるサージ到達時刻検出手法

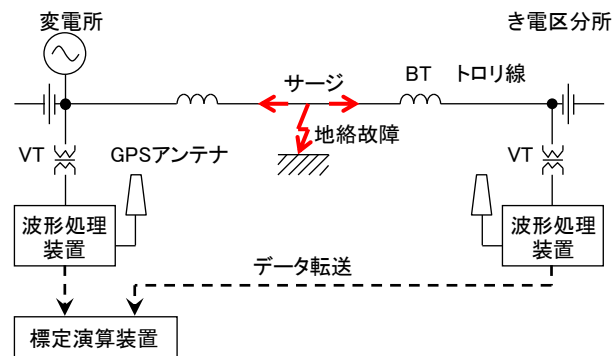


図5 サージ検知形ロケータシステム



図6 試作サージ検知形ロケータ
(波形処理装置)

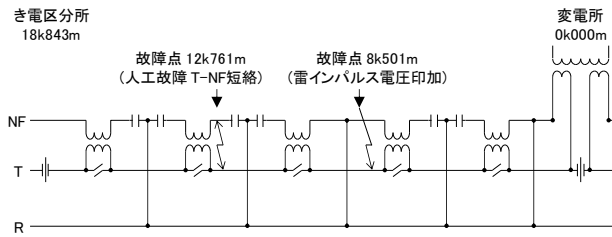


図7 試験系統概略図 (BT き電区間)

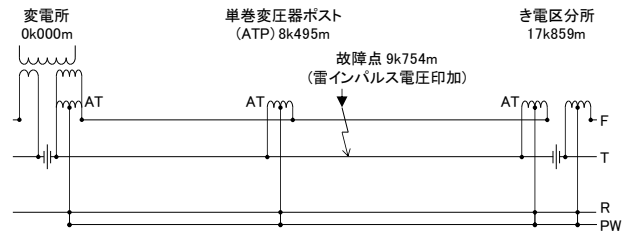


図8 試験系統概略図 (AT き電区間)

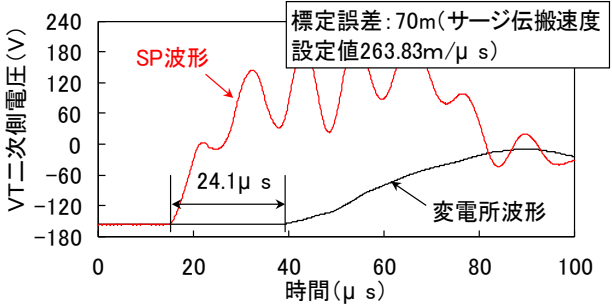


図9 実電圧人工故障による
標定試験波形例 (BT き電区間)

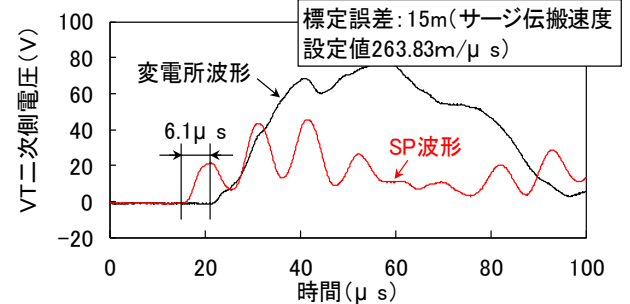


図10 雷インパルス電圧印加による
標定試験波形例 (AT き電区間)

表1 BT き電区間標定試験結果

	雷インパルス電圧印加	人工故障
試験回数	10回	4回
最大誤差	327m	87m
最小誤差	167m	7m
平均誤差	229m	27m
標定巾	133m	107m

標定対象区間長 18.843km
 変電所・故障点間距離 8.501km (雷インパルス), 12.671km (人工故障)
 VT 二次側電圧使用, サージ伝搬速度設定値 263.83m/μs
 標定巾: 標定値のバラツキの巾 (標定値の最大値と最小値の差)

表2 AT き電区間標定試験結果

	雷インパルス電圧印加
試験回数	13回
最大誤差	310m
最小誤差	165m
平均誤差	242m
標定巾	147m

標定対象区間長 17.859km
 変電所・故障点間距離 9.754km

7. 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、サージ検知に既設 VT が利用可能であることを、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にくいこと、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。

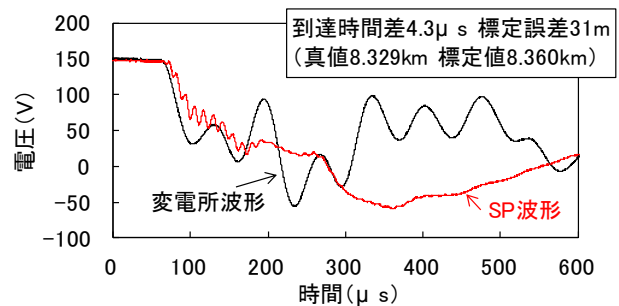


図11 実故障時のサージ検知波形
(AT き電区間・地絡故障, VT 二次側電圧)