33KV非接地系送電線故障区間標定システムにおける故障検出装置の開発

非会員 山本 實
正員 伊福部 敦

正員 村田 吉和
正員 橋本 誠

(北海道電力株式会社)
(住友電気工業株式会社)

Development of Fault Detector for 33KV Un-grounded Power Line
Minoru Yamamoto, Non-Member(Hokkaido Electric Power Company)
Atushi Ifukube, Member(Hokkaido Electric Power Company)
Yoshikazu Murata, Member(Sumitomo Electric Industries)
Makoto Hashimoto, Member(Sumitomo Electric Industries)

We are developing fault section detect system for 33kv un-grounded power line. Fault section is obtained from relation of two point zero phase current on power line. This Fault detector is composed of optical current sensors and processing unit and solar battery system. The optical current sensor consists of a Faraday cell and a porcelain bushing. Zero phase current on processing unit is get through three phase composer with auto gain control and residual current eliminator.

This fault detector have a ability of 0.15A zero phase current detection in factory test. And in field test this fault detector detect earth fault in twice.

キーワード：非接地系送電線、3相合成、零相電流、故障検出、区間標定

1. まえがき

近年、送電線の故障区間標定システムが開発、実用化されており故障時の巡視の効率化に貢献している。この故障区間標定システムは、故障時に架空地線に流れる大きな故障電流により判定するもので、中性点接地系の送電線に適用される⁽¹⁾。しかし、今回対象となる33kv級の送電線は中性点非接地系であることから、地絡故障時に故障電流がわずかしか流れず、従来の故障区間標定システムは適用するのが難しく、故障が発生した場合送電線全区間を巡視し目視で点検しなければならない状況である。そこで、非接地系での巡視の効率化を図るべく中性点非接地系送電線に適用できる故障区間標定システムの開発を行っている。本シ

ステムは、図1に示すような構成のものを目指しており、今回はシステムの核となる故障検出装置の試作、評価を行ったので報告する。

2. 非接地系での故障区間検出方法

＜2.1＞非接地系での故障の様相 非接地系での地絡故障は、接地系と比べて故障電流の様相が異なる。これは、地絡時に流れる故障電流が送電線に分布している対地静電容量による充電電流しか流れないためである。この故障電流（零相電流）について解析を行った。等価回路は静電容量を集中定数で置くことにより、図2で与えられる。今、故障点の両側にZCTを設置するとして、その検出電流を計算すると、

図1 システム構成
Fig.1. Developing System Configuration

図2 非接地系送電線地絡時の等価回路
Fig.2. Circuit of Un-grounded Power Line

$$\dot{I}_{ZCT1} = -3j\omega C_1 \dot{V}_0 \tag{1}$$

$$\dot{I}_{ZCT2} = 3j\omega C_2 \dot{V}_0 \tag{2}$$

ただし、 $\dot{V}$ ：地絡相の健全時の対地電圧、

$\dot{V}_0$ ：零相電圧、 R_f ：地絡抵抗

$$\dot{V}_0 = \frac{-\dot{V}}{1 + 3j\omega(C_1 + C_2)R_f}$$

となる。対地静電容量は線路に沿って一様に分布していると考えられるので、送電線での零相電流の分布は鉄塔数を260基、径間長を100m、対地静電容量を0.00444 ($\mu\text{F}/\text{km}$)、故障位置を80基目として上式より図3のように求められ、

図3 地絡故障時の零相電流の分布
Fig.3. Current at Earth Fault

①地絡電流は故障点に向かって流れ込むので故障点で位相が180度変わる。

②地絡電流の大きさは線路に沿って故障点を頂点とした山形の分布となる。つまり、線路両端より故障点に向かって地絡電流は単調増加していく。

特徴を有する。また、この故障電流の大きさが約0.08A/kmと小さいことも特徴である。

次に短絡故障時の故障電流の特徴は電源から故障点まで使用している電線の許容電流以上の電流が瞬時に流れることである。

図4. 装置位置と検出区間
Fig.4. Detect Section and Detector Position

表1. 検出論理
Table 1. Fault Section detect Logic

区間故障	区間1	区間2	区間3
地絡	$I_{0A} > I_{0B}$ $P_{0A} = P_{0B}$	P_{0A} と P_{0B} が 180°異なる	$I_{0A} < I_{0B}$ $P_{0A} = P_{0B}$
短絡	装置A、装置B共に短絡電流を検出しない。	装置Aが短絡電流を検出、装置Bは検出しない。	装置A、装置B共に短絡電流を検出する。

〈2.2〉検出論理 故障検出は零相電流が設定したしきい値を越えた場合とし、故障区間検出論理は、上記の故障電流の特徴より図4、表1に示す方式とした⁽⁵⁾。図4は基本構成を示したものであり、装置数を増やすことにより検出区間を増やすことができる。尚、位相については、各相電流のいずれかを基準にする。

3. 装置の設計製作

〈3.1〉構成および必要性能 故障検出装置は、図5に示すように電流検出部、処理部、電源部から構成される。電流検出部は光CT碍管と呼ぶ高圧部電流検出器と光ケーブルで構成され、各相の電流を検出する。処理部は、電気/光変換器(E/O-O/E)と検出部から構成され、3相電流の検出信号から故障検出を行う。電源部は太陽電池と蓄電池から構成され、処理部へ電気を供給する⁽⁶⁾。

図5 装置の構成

Fig.5. Configuration of Fault Detector

本装置を開発する上で次の2つの大きな課題があった。1つは、故障検出能力である。非接地系送電線を流れる故障電流は前述のように負荷電流に比べると小さく、必要とされる零相電流の検出能力は、装置を最低でも10km間隔で設置し、変電所リレーとほぼ同性能である完全地絡時の30%の故障電流まで検出できることを条件とすると、

$$0.08 \times 10 \times 0.3 = 0.24 \approx 0.25\text{A}$$

となる。よって、電線の定格電流320Aの1/1000の検出が必要である。もう1つは、電流センサの絶縁性である。送電線は33KVと電圧が高く、かつ裸線である。よって、電流センサは高圧部、処理部は低圧部(大地電位)に設置することとなり、この間を絶縁しなければならない、碍子と同レベルの絶縁信頼性が必要となる。

各部に必要とされる性能をまとめると表2の通りとなる。

〈3.2〉電流検出部 電流検出部には、高電圧の電力線に設置するため、碍子と同レベルの絶縁性が得られ、かつ電氣的誘導の影響がほとんど無いことが必要である。よって、電気信号を用いる巻線型CT方式でなくファラデー効果を利用した光学式電流センサを採用した。本装置では検出する零相電流が小さいことよりできるだけ高感度のものが望ましいため、従来から電流センサとして使用されていたファラデー素子ZnSeに対し表3に示すように高感度な希土類鉄

表2 装置の要求性能
Table 2. Requested Ability of Fault Detector

項目	要求性能	備考
電流検出部	<ul style="list-style-type: none"> 絶縁の信頼性が十分であること。 最低でも500AまではRIGに検出できること。 高電圧下でも安定検出できること。 低温時(-25℃)でも安定検出できること。 	高圧の電力線に設置し、低圧側に情報を伝送するため。 線路の許容電流より。 寒冷地適用
処理部	<ul style="list-style-type: none"> 零相電流検出能力が優れていること。(0.25A目標) 低温時(-25℃)でも安定検出できること。 	微地絡に対応するため 寒冷地適用
電源部	・商用電源の無い場所でも使用できること。	

表3 RIG磁界センサの特性
Table 3. Properties of RIG

	ZnSe	RIG
変調度(%/Oe)	0.0086	0.05
挿入損失(dB)	<12	<12
温度特性(%) -20~+50℃	±2	±2

図6 電流検出部(光CT碍管)
Fig.6. Current Detector

ガーネット(RIG)を採用した⁽²⁾⁽³⁾。

次に高圧部から低圧部への信号伝送であるが、光ファイバケーブルのみでは雨・雪の影響を考えると絶縁性は不十分である。よって、絶縁の信頼性を得るため碍管中に光ファイバを通し、碍管内部を樹脂で充填した。図6に製作した電流検出部を示す。また、本電流検出部は電力用規格「ブッシング」の試験に準じ表4に示す信頼性試験を実施し、問題ないことを確認した。

<3.3>処理部 処理部は電流検出部用の電気光信号変換と3相電流の検出信号より零相電流を求め、零相電流があらかじめ設定したしきい値を越えた場合に故障として検出

表4 電流検出部試験項目
Table 4. Test Menu of Current Detector

絶縁抵抗測定	1kv、2000MΩ以上
AC耐圧試験	70kv、1分
インパルス耐圧試験	±200kv、各5回
部分放電測定	29.8kv時100pc以下
長期耐圧試験	40kv、30日
振動試験*	60Hz、±2mm、24H
浸水試験*	水面下150mm、3日間
温度試験*	-30~+50℃

*：試験後AC耐圧、インパルス耐圧試験実施

する処理を行う。本構成では零相電流検出時に次の問題点がある。3相個別に検出し、その後3相合成して零相電流を得る場合、電流センサの感度誤差や電子部品定数誤差のため各相電流の検出信号を単純に加えても零にならない。そのため、任意の相の増幅度を変えて、零に近くなるように調整するが、電流センサ、電子部品の温度特性の個体差により1度零相電流を零に調整しても時間が経過すると残留分が発生する。今回のように定格電流320Aの各相電流の約1/1000の微小電流検出を行う場合この零相残留分は無視できず、誤動作の原因となる。この対策として、常時の零相残留分を故障検出に影響無いレベルに小さくするためハード面ソフト面両方から次の処理を施した。

a)ハード面 3相のうち2相のアンプ部に緩慢なゲインコントロール機能を付け、常時の3相合成値が一定値以下となるようにCPUから制御する。

b)ソフト面 3相合成値に対し現時刻のデータと一定サイクルまえのデータとの減算を行い、定時的な残留分を除去する(差分処理)。

これらの処理により急激に発生する故障時の零相電流を精度良く検出することが可能となる。図7に処理部のブロック図を示す。

<3.4>電源部 電源部は、本装置が商用電源の得られない山中に置かれる場合が多いため、太陽電池と蓄電池で構成した。設計方針としては、降雪地域での使用となるため一年間の内、日射量の少ない12、1、2、3月の日射量から容量を算出した。

図7 処理装置のブロック図
Fig.7. Block Diagram of Processing Unit

図8 工場内試験構成
Fig.8. Test Circuit

4. 装置の基本特性

図8に示す試験構成の工場内試験により本装置の基本特性を調べた結果を表6、図9、図10、図11に示す。図9は電流検出能力の結果で500Aまでリニアリティがあり誤差は $\pm 5\%$ 以内である。図10は常時の零相電流の大きさを示しており、このときのゲインコントロール後の3相合成レベルは約0.2Aであったが、差分処理によりMAX0.06Aまで減少しており、差分処理による残留分除去が効果的に働いていることがわかる。図11はしきい値を0.15A、0.25Aに設定し、図8に示す故障電流用電源により故障電流を突印したときの装置の検出確率を調べたものである。これより装置の検出誤差は $\pm 0.04A$ であり、安定した負荷電流の場合0.15Aの故障電流でも故障検出が可能である。

表6 装置の基本特性

Table 6. Properties of Fault Detector

各相電流検出能力	
最大検出電流	500A
電流検出誤差	$\pm 5\%$
零相電流検出能力	
常時零相電流	MAX0.06A
検出誤差	$\pm 0.04A$
消費電力	3W以下

図9 電流検出結果
Fig.9. Result of Current Detection

図10 常時の零相電流
Fig.10. Residual Zero Phase Current

図11 零相電流検出能力
Fig.11. Ability of Zero Phase Detection

5. フィールド試験

零相電流検出能力は工場内の評価では目標以上の0.15A検出が確認されたが、実線路では工場内の試験用安定負荷状態ではなく、常にレベル変動、周波数変動、位相変化がある。これらが急激に変化すると差分処理により得られる零相電流がしきい値を越え、故障として検出する場合がある。したがって、フィールド試験の目的は故障検出の実証はもちろん、実負荷の変動の装置への影響度を調べ、実用化できる零相電流検出レベルを見きわめることである。そのため、フィールド試験では故障検出のしきい値を0.15Aに設定

図12 日高線系統図
Fig.12. Hidaka Power Line

図13 装置の設置状況
Fig.13. Fault Detector

し、得られたデータより0.2A、0.3A等での検出頻度を調べられるようにした。装置は図12に示すような33KV日高線のNO.1鉄塔とNO.55鉄塔に設置した。設置状況を図13に示す。また、測定データ記憶用のパソコンを同一場所に設置した。

フィールド試験は93/6より開始し、現在まで、5カ月の間で2回の線路故障が発生しており、装置は2回とも検出した。図14は隣の類似線で故障が発生したときの検出波形であり、図中の3相合成電流はゲインコントロールを施した後3相を合成して得られた波形で、零相電流は3相合成電流に対し、差分による残留分除去後の波形である。これより零相電流の大きさと位相はNO.1鉄塔装置で、1.05A, 197deg、NO.55装置で1.99A, 197degと求められ、表1の標定論理より区間外の浦河変電所側と標定でき、装置の正常動作が確認できた。一方、負荷変動の影響であるが、93/6,7の2カ月間で2つの装置で約300件の故障外検出をしており、

図14 故障検出波形
Fig.14. Waveform of fault current

図15 フィールド試験での故障外検出件数のしきい値別頻度
Fig.15. Frequency of detection at each Threshold Level in field test

しきい値別に頻度を調べると図15の通りとなり、故障外検出を実線路で本装置を適用する際のノイズと見なすとノイズは検出レベルを下げる場合避けられず、0.2A以下で急増することが分かる。よって、当線路ではしきい値は上記ノイズの影響が少ない0.25A以上が良いと考えている。また、ノイズの識別方法については、図1のシステムで各検出装置の検出データと変電所リレー情報との時間的同期を行う

ことを検討し、十分識別できる目処を得た。

6. まとめ

非接地系送電線の故障区間標定システムにおける故障検出装置の試作、評価を実施し、工場内評価で所期の性能を確認できた。また、フィールド試験においても実際に故障を検出できることが確認でき、負荷変動の影響の程度も把握できた。今後は、図1で示した故障区間標定システムの構築を進める。

(平成5年11月29日受付)

文献

- (1)森貞夫、石橋武、井原将、檜林弘一、木村祐司「OPGWを利用した故障点標定システムの開発」昭60年住友電気、第127号(昭60-9)
- (2)T. Mitsui, K. Hosoe, H. Usami, S. Miyamoto: "Development of Fiber-optic Voltage Sensors and Magnetic-field Sensors", IEEE/PES Summer Meeting, 86 SM 442-8(1986-7)
- (3)浅原陽介、石川治男、大住修司、朝倉聡章、中村「磁界センサ用Bi置換ガーネット」平3年日本応用磁気学会学術講演概要集
- (4)和田道夫、不動弘幸、江川進、阿部則雄、松村徹「配電線運転状態モニタリングセンサの開発」平5電力エネルギー部門大会、No. 299 (平5-7)
- (5)山本實、畑山昇、橋本誠、檜林弘一「非接地系送電線事故区間標定装置の標定方式の検討」平5年電気学会全大、No. 1355 (平5-3)
- (6)山本實、伊福部敦、橋本誠、村田吉和「非接地系送電線故障区間標定装置の開発」平5年電力エネルギー部門大会、No. 341 (平5-7)

山本 實 (非会員) 1963年北海道電力株式会社入社。
現在工務部工務業務グループ主査。

伊福部 敦 (正員) 1967年北海道電力株式会社入社。現
在工務部技術開発グループリーダー。

村田 吉和 (正員) 1949年6月30日生まれ。74年3月名古屋大学工学部電気工学科修士課程修了。同年住友電気工業㈱入社。主として、原子力発電用ケーブル、光ファイバ応用送配電線監視装置の開発を経て、現在地中配電線の設計開発に従事。

橋本 誠 (正員) 1964年3月4日生まれ。88年3月岡山大学電気工学科修士課程修了。同年住友電気工業㈱入社。主として送電線保守システムの開発に従事。