配電線運転状態モニタリングシステムの開発

正 員 不動弘幸 (関西電力)

正 員 篠崎孝一 (関西電力)

正 員 川崎幸男 (関西電力)

正 員 阿部則雄 (住友電工)

正 員 江川 進 (関西電力)

非会員 戸田和郎 (松下電産)

Development of a Distribution Line State Monitoring System

Hiroyuki Fudou, Member, Yukio Kawasaki, Member, Susumu Egawa, Member, Kouichi Shinozaki, Member (Kansai Electric Power Co., Inc.), Norio Abe, Member (Sumitomo Electric Industries, Ltd.), Kazuro Toda, Non-Member, (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.)

In order to improve the reliability of electricity service, a distribution line state monitoring system has been developed, which is composed of the central control unit, the remote control switches, the slave unit and the monitoring sensors. The first system employed fiber-optic voltage and current sensor. The latest system employs a unique form of cost reduction, with no voltage sensors incorporated. This system can detect the grounding direction by the information of the phase difference between the line-to-line voltage and I_0 provided by the monitoring sensor, and grounded line information (64 ϕ) from the substation. The installation of the system has been proceeding since 1992, at present, displays its performance.

キーワード: 配電自動化, 配電線自動運用, モニタリング, 光センサ, 開閉器子局

1. まえがき

配電線の供給信頼度を示す指標のうち、事故件数は開閉器のオイルレス化、電線の絶縁化、耐雷設備の強化などで近年著しく減少しており⁽¹⁾、事故停電時間も開閉器遠隔制御システムの導入で減少傾向を示している⁽²⁾。

しかし、この開閉器遠隔制御システムでは配電線事故時の区間特定までを従来の時限順送式によっているため、1配電線の分割可能区間は8区間となっている。

このため、郡部配電線のように区間こう長の長い場合には、事故点の探査に時間を要し長時間停電を招いていた。

そこで、この解決を図る要素技術として光方式電流センサ⁽³⁾を用いた配電線運転状態モニタリング・センサを開発した。この配電線運転状態モニタリング・センサを配電線の1区間当たり2組以上設置し、開閉器遠隔制御システムと組み合わせることにより、事故区間を従来の1/2以下にできる配電線運転状態モニタリングシステムとして完成させた。

システムの開発の結果、事故停電時間の短縮に寄与するとともに、従来不可能であった再閉路成功事故の原因区間特定をも可能とした。

本論文では、これらの要素・システム技術を中心に報告する。

2. 配電線運転状態モニタリング・センサの開発

センサ部は、図1のように配電自動化開閉器施設柱の高圧各相に設置し、配電線の電圧・電流を検出させるものである。

図1 電圧および電流センサの構成

Fig.1. Construction of the fiber optic voltage and current sensor system.

電圧センサ部は絶縁電線の絶縁信頼度を低下させないよう図2のように非接地とし、電線・大地間の電位差を2枚の電極で分圧したコンデンサ分圧器と対地浮遊静電容量により分担電圧 V_s をボッケルス素子(BSO)で測定している。なお、分担電圧 V_s は次式で表される。

分担電圧を約200Vの設計としており、対地浮遊静電容量 C_3 は1pF程度であり、 $C_1 \approx 20$ pF、 $C_2 \approx 20$ pFのコンデンサ分圧器とした。

センサ部は、設置の容易性から2分割構造で、電線を挟み込む形状とし、また、ポリエチレン樹脂ケースに収納し樹脂充填により気密構造としている。この構造では分圧電極の第2電極電位は固定されたものでなく、ケース表面の汚損・積雪・降雨時の表面抵抗低下により分担電圧低下を招くことが想定される。そこで図3に示すセンサ設置状態での等価回路でシミュレーションにより検討した。

降雨時にはセンサケース表面に付着した水が導電層を形成するので R_s （センサ表面の抵抗）、 R_w （絶縁電線表面の抵抗）、 R_{ws} （絶縁電線表面－センサ表面間の抵抗）が変化する。この場合に分圧電極に誘起される電圧振幅と位相差の変化のシミュレーション結果は図4のようになる。

Figure 1 consists of two vertically stacked plots sharing a common x-axis representing surface resistance in Ohms (Ω) on a logarithmic scale from 10^6 to 10^{14} .

The top plot shows the Amplitude in percent (%). The y-axis ranges from 50 to 100. The curve starts at approximately 48% for $10^6 \Omega$, remains relatively flat until about $10^7 \Omega$, then rises steeply, passing through 50% at $10^8 \Omega$, and reaches 100% by $10^{10} \Omega$, remaining at 100% for higher resistances.

The bottom plot shows the Phase Difference in degrees (deg). The y-axis ranges from 0 to 20. The curve starts at 0 for $10^6 \Omega$, rises to a peak of 20 degrees at $10^8 \Omega$, and then falls back to 0 by $10^{10} \Omega$, remaining at 0 for higher resistances.

Fig. 4. Amplitude and phase of voltage sensor output vs. surface electrical resistance R_s , R_w , R_{ws} of voltage sensor. (calculated values)

すなわち、表面抵抗が $10^{10} \sim 10^8 \Omega$ から振幅の低下が見られ、振幅は $10^7 \Omega$ 以下では $1/2$ 以下となる。位相差は $10^8 \Omega$ 程度で変化が最大となり約 20° となる。

次に、光ケーブル部とセンサ部表面とが濡れ、それぞれの水膜がつながった場合、つまり R_s (センサ表面の抵抗)、 R_c (光ケーブル表面の抵抗)、 R_{cs} (光ケーブル表面－センサ表面間の抵抗) が変化したときの分圧電極に誘起される電圧振幅と位相差の変化のシミュレーション計算結果は図5のようになる。

すなわち、振幅および位相差が変化し始める抵抗値は図 4 の場合と同様であるが、電圧振幅の変化は $10^7 \Omega$ 以下では乾燥時の 5 倍以上、位相差の変化は $10^8 \Omega$ 程度で約 40° にもなる。

図5 表面抵抗 R_s 、 R_c 、 R_{cs} と出力電圧・位相の関係 (シミュレーション結果)

Fig.5. Amplitude and phase of voltage sensor output vs. surface electrical resistance R_s , R_c , R_{cs} of voltage sensor. (calculated values)

このため、本センサでは図6のようにセンサの両端とケーブル部に水切り部を設けて、 R_{ws} と R_{cs} を十分大きくする対策を実施している。この対策により、センサ出力変動が20%程度の変化から、地絡事故検出に支障ない程度(数%)に抑制できることを実験により確認している。

電圧センサでの計測データは、光ファイバケーブルで電柱下部の光信号処理部へ伝送し、データ処理させている。

図6 センサ部の外観

Fig.6. Appearance of sensor.

〈2.2〉 電流センサ部⁽³⁾

電流センサ部は、導体部の通過電流による発生磁界をギャップ付き環状鉄心により収束し、ギャップ部に配置したファラデー素子により電流検出する方式とした。この電流センサ部は図6の電圧センサ部と一体化構造としている。

従来のファラデー素子では、地絡電流が検出可能な高感度、日射や通電電流に起因する温度による感度変化の極小化が期待できないことから、希土類鉄ガーネット結晶($\text{Bi}_{1.3}\text{Gd}_{0.43}\text{Y}_{1.27}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$)による新しいファラデー素子を開発した⁽³⁾。これにより、感度は $5.0^\circ/(\text{Oe} \cdot \text{cm})$ となり、感度変化は図7のように $-20 \sim +80^\circ\text{C}$ の温度範囲で $\pm 0.5\%$ 内に抑制できるようにな

った。

電流センサでの電流計測データは、光ファイバケーブルを介して電柱下部の光信号処理部へ伝送し、データ処理させている。

図7 希土類鉄ガーネット結晶の感度の温度変化

Fig.7. Temperature variation of sensitivity of the Bi-substituted rare-earth iron garnets.

3. 事故検出原理

〈3.1〉 電圧・電流センサを利用した事故検出

本方式は、各相の電圧検出と各相の電流検出を行ない、開閉器制御用子局内の信号処理回路で電気信号に変換したのち三相合成して V_0 、 I_0 を算出し、地絡検出およびその他の事故検出を行なう方式である。

また、本方式での検出性能は表1のとおりであり、信号処理のブロック図を図8に示す。

表1 検出性能

Table.1. Characteristics of detecting.

区 分	検 出 性 能
負荷電流計測	0～510 A (線路定格電流400 A)
地 絡 検 出	V_0 が190 V以上かつ I_0 が0.4 A以上 (V_0 基準の位相が $-20 \sim 120^\circ$ で負荷側、 $160 \sim 60^\circ$ で電源側事故)
過 電 流 検 出	480 A以上かつ100 ms以上
断線欠相検出	V_0 が190 V以上かつ1相電流の低下が37.5%以上

図8 信号処理ブロック図

Fig.8. Block diagram of signal processor.

a. 地絡事故検出

信号処理回路で算出された V_o 、 I_o を基に従来の判定方式で地絡事故検出を行っているが、絶縁電線へのセンサ取り付け状態のばらつきなどによる残留成分除去のためD/Aコンバータによるゲイン調整回路を付加している。

この結果得られた V_o 、 I_o の大きさと位相角から地絡事故の有無および地絡方向判別（センサ取り付け点の負荷側、電源側の区分）をさせている。

b. 過電流（短絡事故）検出

電流センサでの各相計測電流値のいずれかが、設定値超過の場合を過電流と認識させている。

c. 断線・欠相事故検出

断線・欠相が発生した地点より負荷側では V_o が現れ、負荷電流も低下するので V_o の大きさと負荷電流の変化率から発生を検出している。

〈3.2〉 電流センサのみを利用した事故検出

前述の〈3.1〉項の事故検出方式は、フィールド試験でも十分な実用性を検証できたが、さらに、コスト面からの見直しを図った結果、光電圧センサを用いない事故検出方式を開発した。電流センサのみを利用する方式では、図6のセンサ部から電圧センサ部およびコンデンサ分圧器を取り除いたもので図9のようなセンサとした。

図9 電流センサの外観（三相分）
Fig.9. Appearance of current sensor.

a. 地絡事故検出

配電自動化開閉器施設柱では、開閉器の制御電源としてAC相電圧を利用している。そこで、この信号と電流計測信号を処理して地絡検出と地絡方向判定ができる新方式を考案し、表2の3種類について検討した⁽⁶⁾。

案1は、変電所と開閉器制御用子局（以下、子局という）とで共通の線間電圧 V_1 （ V_{ca} 相当）を基準とし、変電所で計測した V_o と V_1 との位相差 θ_1 と、子局で計測した I_o と V_1 との位相差 θ_2 を、配電自動化伝送路を通じて中央装置に集め、 $(\theta_2 - \theta_1)$ を演算し地絡方向判定を行うものである。

案2は、案1とは逆に変電所で計測した θ_1 を配電自動化伝送路を通じて子局へ伝送し、子局で $(\theta_2 - \theta_1)$ を演算して地絡方向判定を行うものである。

案3は、変電所で検出した地絡相と子局で計測した θ_2

表2 地絡検出方式の比較

Table.2. Comparison of block schematic diagrams of detecting ground faults.

方式	変更点
案1	<p>(センサ) ・光センサ部/回路の変更 ・$\phi V_1 - \phi I_o$測定</p> <p>(子局) ・位相差情報送信 (変電所子局) ・$\phi V_o - \phi V_1$測定/通信 (中央装置) ・位相差の演算→方向判定</p>
案2	<p>(センサ) ・光センサ部/回路の変更 ・$\phi V_1 - \phi I_o$測定 ・$\phi I_o - \phi V_1$データ受信 (子局) ・位相差情報の受信 (変電所子局) ・$\phi V_o - \phi V_1$測定/通信 (中央装置) 変更なし</p>
案3	<p>(センサ) ・光センサ部/回路の変更 ・$\phi V_1 - \phi I_o$測定</p> <p>(子局) ・位相差情報の送信 (変電所子局) 変更なし ・64ϕは従来からある (中央装置) ・判定表に基づき地絡方向を断定</p>

を配電自動化伝送路を通じて中央装置に集め地絡方向判定を行うものである。

これらを比較して既導入の開閉器遠隔制御システムの変更量が最も少ない案3を採用した。ここで、案3の地絡方向判定原理について詳細を述べる。

線間電圧 V_{ca} を基準とした地絡点の負荷側の零相電流 I_{o1} および電源側の零相電流 I_{o2} の1線地絡時のベクトル軌跡は図10で示される。

図10 V_{ca} 基準の I_{o1} および I_{o2} のベクトル軌跡
Fig.10. Vector orbits of I_{o1} and I_{o2} on grounding.

図10より、地絡抵抗 R_g が変化した場合の I_{o1} と I_{o2} の変化領域には重なりがあり、 I_o のみでは地絡方向判定ができない。しかし、 64ϕ （地絡相判別継電器）で地絡相が特定できると図11のように地絡方向判定領域の分離が可能となる。

この考え方を検証するため、図12に示す人工地絡試験装置で水の抵抗値で模擬した R_g を変え、線路模擬容量を2.188 μ F（完全地絡時の1線地絡電流約3A相当：周波数60Hz）として地絡実験を実施した。

実験結果は図13に示すとおりで、横軸は地絡抵抗の代わりに零相電圧 V_{ca} で表しており、理論値とよく一致することから新しい方向判定手法の実現性が確認できた。

図11 地絡相別の地絡方向判定

Fig.11. I_o vector of each phase on grounding.

図12 人工地絡試験装置

Fig.12. Equipment for artificial grounding test.

図13 零相電圧と $(I_o - V_{ca})$ の位相差

Fig.13. Zero-phase voltage vs. phase difference of I_o to V_{ca}

この結果を受け、位相差測定は方向誤判定のない範囲で実施できればよいことを考慮し 360° を 22.5° 刻みで16分割し、表3のように処理ビット数を最小化した地絡方向判定テーブルを作って中央装置で処理させている。

表3 中央装置での地絡方向判定テーブル

Table.3. Grounding direction determination table.

位相差No.	64 ϕ	A相地絡	B相地絡	C相地絡
0			1側地絡	
1				2側地絡
2		1側地絡 (電源側)	不感帯	
3				不感帯
4			2側地絡	
5				1側地絡
6				
7		不感帯		
8				
9		2側地絡 (負荷側)	不感帯	
10				不感帯
11			1側地絡	
12				2側地絡
13				
14				
15		不感帯		

b. 過電流（短絡事故）検出

<3.1>項の事故検出方式と同一の検出条件としている。

c. 断線・欠相事故検出

負荷電流の80%以上の急激な低下、電源電圧の80V以下の低下、負荷電流低下相以外の2相が逆位相のAND条件を断線・欠相の検出条件としている。

これらの事故検出処理を行う信号処理回路は、図14の信号処理ブロック図とした。

図14 信号処理ブロック図

Fig.14. Block diagram of signal processor.

4. 子局の構成・機能

3項で述べた2つの事故検出方式のうち、コスト面から電流センサのみを利用した検出方式を採用した。子局は図15の構成とし、従来の子局の構成に次の部分を付加している。

- ① 子局CPU部と光信号処理部とのインターフェイス
- ② 配電線停電時の電源バックアップ機能部

以下、配電線停電時の電源バックアップ機能について述べる。事故区間の検出のためには配電線停電時に子局での

検出情報を配電自動化用伝送路を通じて中央装置に送出する必要がある。このため、子局には配電線停電時に検出情報を送出するためのバックアップ電源の設置が必須となる。

配電自動化の伝送路方式には、伝送路に同軸・ペアケーブルを使用する通信線方式と電力線そのものに信号注入する配電線搬送方式とがあり、各々の場合について以下に示すとおり異なるバックアップ方式を採用した。

a. 通信線方式の場合

バックアップ電源として、子局消費電流420mA、通信時間90s/回、通信回数100回、充電回路不要の要求条件を満足する二酸化マンガンリチウム電池を採用している。取換え頻度を考慮した場合、寿命10年以上のメンテナンスフリーの条件が必要となる。

図16は、二酸化マンガンリチウム電池について-20℃の過酷条件下で定温保存試験を実施した結果を示すものである。これから10年間の劣化を推定すると65サイクルとなり、残存容量から見て必要なバックアップ回数100回に対し2倍以上の安全率があり上記選定電池で問題ないことになる。

図15 子局部の構成
Fig.15. Construction of slave unit.

図16 二酸化マンガンリチウム電池の定温保存試験による保存期間と通信可能回数

Fig.16. Retained capacity (the number of times of communication) vs. storage temperature and period for Li/MnO₂ batteries.

b. 配電線搬送方式の場合

配電線搬送方式では、配電線事故などの停電中は線路途中の開閉器が無電圧開放機能により開放されるため中央装

置までの信号伝送路が断たれてしまう。しかし、隣り合う子局同士は伝送路断とならないため通信が可能である。

そこで、本方式の場合は停電中に中央装置まで通信するのではなく、事故情報を持つ子局が自局より電源側にある開閉器の子局まで送信し、再送電時に電源側開閉器の電源が確保された時点で検出情報を電源側開閉器の子局からその情報を中央装置に伝達するシステムとした。

このため、通信時間およびマージンを含め5秒間のバックアップとし、必要容量のコンデンサを子局に内蔵させるバック方式⁽⁷⁾とした。

5. システム全体の構成・機能

配電線運転状態モニタリングシステム全体の構成は図17に示すとおり中央装置(営業所CPU)、変電所子局、伝送路、子局、電流センサよりなっている。

図17 配電線運転状態モニタリングシステム全体の構成
Fig.17. Configuration of a Distribution Line State Monitoring System

伝送路が同軸・ペアケーブルの場合について、地絡事故時を例に、システム全体の動作を示すと次のようになる。

- 1) 電流センサ部は正常時には各相の電流を計測し、 I_0 を監視する。
- 2) I_0 が閾値以上になると、事故情報(地絡発生、位相差 θ_2)を子局に伝送する。
- 3) 配電用変電所の地絡方向継電器のトリップによる遮断器の開放で事故停電となる。
- 4) 子局はバッテリー運転(90秒)状態となり事故情報をメモリーする。
- 5) 変電所子局は停電中の子局からの情報(θ_2)と64φによる地絡相を中央装置に伝送する。
- 6) 中央装置では θ_2 と64φによる地絡相情報から地絡方向判定し、事故区間の限定と自動融通を行う。

事故区間の限定は、従来からの時限順送による事故判定区間と短絡・地絡方向のモニタリング情報に基づく事故判定区間とのAND条件により実施している。図18にモニタリング情報による事故区間限定例を示す。

図18 モニタリング情報による事故区間限定例

Fig.18.Example of failure section isolation using monitoring information.

従来は順送時限（7 n 秒）を有する開閉器で区分される区間単位に自動融通範囲が制限され、8 区間超過時には区間中に手動開閉器を施設していた。

しかし、区間中の手動開閉器をモニタリング機能付きの自動開閉器（8 区間超過のため投入時限は0 秒設定）に取り替えることで、7 n 秒設定開閉器投入と瞬時に0 秒設定開閉器が投入することになる。このため、再閉路継電方式での8 区間頭打ちの条件を変更することなく、実質的に倍区間確保が可能となった。

これにより、自動融通範囲が拡大し、事故区間縮小化による事故復旧時間の大幅な短縮が可能となった。

電流センサから中央装置までのシステム全体の総合試験は、電力中央研究所赤城試験センターの模擬配電線での事故発生を関西電力の営業所の中央装置に情報伝送する形態で実施し、事故区間の検出・判定から自動融通に至る一連の処理が中央装置で確実に実施できることを確認できた。

6. おわりに

本報告では、配電線運転状態モニタリングシステムの開発について希土類鉄ガーネット結晶を使用した配電線運転状態モニタリング・センサの開発結果を踏まえて、一層の事故停电時間短縮が達成でき、かつ既設の配電線自動運用システムと融合できるシステムを提案した。

特に、地絡事故の検出および処理について新しい方式を見いだすことができ、この部分を中心に報告した。

本システムは、関西電力の営業所において順次導入を実施し、現地での検出例も報告⁽⁸⁾されており、今後より一層の事故停电時間短縮に寄与するものと思われる。

報告した技術が配電線自動運用システムの高度化等につながれば幸甚である。おわりに、本研究に協力頂いた開閉器子局と中央装置のメーカーおよび実験に協力頂いた電力中央研究所の関係者の方々に謝意を表します。

（平成7年2月28日受付，同7年6月15日再受付）

文 献

- (1) 関根泰次監修：「配電技術総合マニュアル」，（1991年）オーム社
- (2) 不動：「関西電力における配電総合自動化システム」，電気評論（1992年10月号）第77巻第10号
- (3) 和田・不動・江川・石塚・石河・伊藤：「光方式電流センサ用希土類鉄ガーネット結晶」，電学論C，112，793～797（平4-12）
- (4) 和田・不動・松田・石塚・福井：「配電線運転状態モニタリングセンサの開発」，平3電気学会産業応用部門全国大会
- (5) 和田・不動・江川・阿部・松村：「配電線運転状態モニタリングセンサの開発」，平5電気学会電力・エネルギー部門大会，No299
- (6) 不動・和田・江川・石河・戸田：「配電線運転状態モニタリング改良型センサの開発」，平4電気学会・電力技術研究会，PE-92-21
- (7) 和田・不動・朝倉・林・岸田・神馬：「配電線搬送方式事故探索子局の開発」，平5電気学会電力・エネルギー部門大会，No328
- (8) 水谷・川崎・安宅・阿部・松村・清水：「配電線用光センサの現地検出例について」，平6電気学会全国大会，No1393

不動 弘幸

（正員）1947年11月15生まれ。66年3月兵庫県立洲本実業高校電気科卒業。同年関西電力（株）入社。71～73年京都大学電気工学科聴講生。主として、配電線運用の高度化関係の研究に従事。現在、同社総合技術研究所主任研究員。元年度オーム技術賞受賞。平成6年度電気学会論文賞受賞。

川崎 幸男

（正員）1960年1月3日生まれ。82年3月京都大学電気工学科卒業。同年関西電力（株）入社。主として、配電自動化関係のシステム開発に従事。現在、同社お客さま本部ネットワーク技術グループ副長。

江川 進

（正員）1960年6月10日生まれ。81年3月和歌山高専電気工学科卒業。同年関西電力（株）入社。現在、同社お客さま本部ネットワーク技術グループにて配電自動化システムの開発に従事。平成6年度電気学会論文賞受賞。

篠崎 孝一

(正員)1956年10月17日生まれ。77年3月明石高専電気工学科卒業。同年関西電力㈱入社。現在、同社総合技術研究所流通設備研究室副主任研究員。主として、配電自動化関係の研究に従事。

阿部 則雄

(正員)1950年1月13日生まれ。75年3月京都大学工学部大学院修士課程終了。同年住友電気工業㈱入社。主として、ケーブルおよびセンサの研究に従事。現在、同社電力機器部主席。

戸田 和郎

(非会員)1959年1月16日生まれ。82年3月筑波大学基礎工学類卒業。同年松下電器産業㈱入社。主として、光センサの開発に従事。現在、同社ネットワーク開発推進グループ主任技師。