

音声帯域伝送路を用いる送電線保護用電流差動リレー

Differential Protection Relays Applying Voice-Band Channel

大野 博文 杉浦 秀昌 菊崎 朋裕
 ■ OHNO Hirofumi ■ SUGIURA Hideaki ■ KIKUZAKI Tomohiro

電力系統の保護には電流差動リレーが広く採用され、送電線保護にはPCM (Pulse Coded Modulation) 通信を使用し、送電線の各端子の電流データを伝送し合い、全端子分の電流データを収集し差動演算する方式を採っている。現行の電流差動リレーのデータ収集手段は、リレー専用の高速伝送を行うための伝送設備を必要とし、電流差動リレー適用にあたっては、この通信設備を含めて構築する必要があったが、音声帯域伝送路を使用する送電線保護用電流差動リレーでは、この通信設備を新たに導入することなく、既にある通信設備を使用することで実現することができる。

Differential protection relays are widely used in the field of power system protection. Transmission lines are protected by a method in which differential currents are calculated after current data of all terminals are collected. For this purpose, optical fibers or microwave communication are required as the data communication channel between terminals. Usually, a set of communication equipment is also employed to create a high-capacity channel.

Toshiba has proposed a differential protective relay system that applies a voice-band channel as the communication line. Accordingly, our system does not require the new installation of a communication channel but uses an existing voice-band channel to ensure power system protection.

1 まえがき

電流差動リレーは動作原理が簡単で、高感度かつ高速で事故を検出できることから、送電線の保護用リレーとして広く利用されている。現行の送電線保護用電流差動リレー(以下、送電線保護リレーと略記)は、各端子の電流データの瞬時値をPCM通信により伝送し合うため、高速度(54kビット/s)の伝送路を使用している。また、各端子の電流データは、同一タイミングの瞬時値データを使用して差動演算を行うため、サンプリング同期を取る必要がある。

このため、対向する送電線保護リレー間の上りと下り伝送路の伝送遅延時間差や、伝送遅延時間変動の少ない伝送路を必要とする。この要求を満足させるために、現行の送電線保護リレーには専用の搬送装置CR-MUX (Carrier Relay MultipleXer) や光ケーブルで伝送路を構築しており、伝送系を含めた設備構築のコストを高くしている。

このような背景を踏まえ、変電所に既にあるメタルケーブルや搬送装置の音声チャンネルを伝送路(以下、音声帯域伝送路と呼ぶ)として適用できる、送電線保護リレーの開発及び実用化を行った。

2 システムの概要

音声帯域伝送路を用いる送電線保護リレーは、伝送速度を9600ビット/sとしてITU-T(国際電気通信連合電気通信標準

化部門) V.29準拠の音声帯域モデムを適用することで、メタルケーブルや搬送装置1.5M MUX (1.5Mビット/s MUX)の音声チャンネルを伝送路に使用できるようにしたものである。

現行の送電線保護リレーと、音声帯域伝送路を用いる送電線保護リレーのシステム構成を図1に示す。現行の送電線保護リレーは、リレーユニットから伝送速度54kビット/s、伝送周期720 Hz(電気角30°)で伝送を行い、電気/光変換

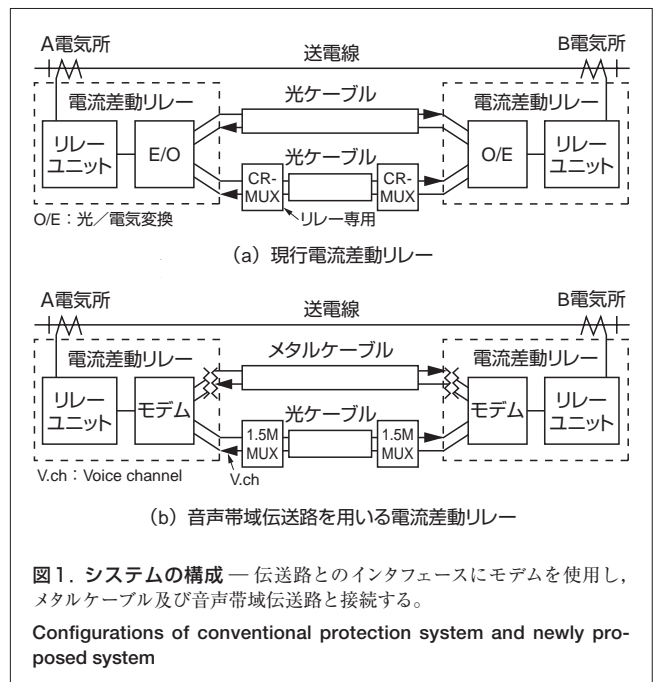


図1. システムの構成 — 伝送路とのインタフェースにモデムを使用し、メタルケーブル及び音声帯域伝送路と接続する。

Configurations of conventional protection system and newly proposed system

(E/O)を通して伝送系(光ケーブル又はCR-MUX)と接続する。音声帯域伝送路を用いる送電線保護リレーは、リレーユニットから伝送速度9600ビット/s、伝送周期180 Hz(電気角120°)で伝送を行い、モデム、絶縁トランス^(注1)を通して音声帯域伝送路(メタルケーブル又は1.5 M MUX)と接続する。

3 システムの特徴

音声帯域伝送路を用いるため、現行のCR-MUXや光ケーブルを適用する場合に比べ、伝送速度が低速になる。

この低速の伝送路を適用する送電線保護リレーについて、現行との違いを表1に示し、特徴を以下に述べる。

項目	現行リレー	今回開発リレー
伝送インタフェース	CR-MUX 光ケーブル	1.5M MUX (V.ch) メタルケーブル
伝送速度	54 kビット/s	9600 ビット/s
伝送周期	720 Hz (電気角: 30°)	180 Hz (電気角: 120°)
伝送量	瞬時値	フェーザ量
フレーム長	75 ビット/30°	53 ビット/120°
伝送電気量	12ビットデータ伝送 短絡:各相電流 地絡:零相電流 (零相電流は3分割伝送)	8ビットデータ伝送 短絡:正相電流 地絡:零相電流 (零相電流は2分割伝送)
CRC	16ビット	12ビット
データ圧縮	—	μ -law
動作時間	短絡:約30 ms 地絡:約80 ms 地絡は、過渡応動対策 時限50 msを含む	短絡:約50 ms 地絡:約100 ms 地絡は、過渡応動対策 時限50 msを含む

3.1 正相及び零相電流のフェーザ量伝送

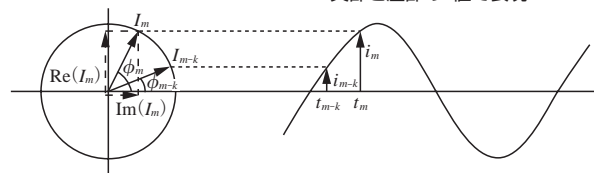
伝送データ量削減のために、短絡事故検出を各相電流による判定から対称成分である正相電流による判定とし、正相電流と零相電流の2量を伝送する。また、電気角120°ごとの伝送データで差動電流演算及び振幅値演算を実現するために、瞬時値ではなくフェーザ量を伝送する。フェーザ量は図2に示すように、実部と虚部の直交する2量で表す。これにより、差動電流は成分ごとの和で、振幅値は各成分の二乗和の平方根で求めることができる。フェーザ量は、離散フーリエ変換(DFT: Discrete Fourier Transform)を用いて(1)式で算出する。

$$I_m = j \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i_{m-k} e^{-j \frac{2\pi k}{N}} \quad (1)$$

I_m : m 時点の電流フェーザ量

(注1) 絶縁抵抗(DC500 V, 2 M Ω), 商用耐電圧(AC 2000 V), インパルス耐電圧(4000 V, 1.2 \times 50 μ s)

電流の瞬時値: $i = \sqrt{2} I_{rms} \sin(\omega t + \theta - \phi)$ のとき,
フェーザ: $I = \sqrt{2} I_{rms} e^{j(\omega t + \theta - \phi)} = \sqrt{2} I_{rms} \{ \cos(\omega t + \theta - \phi) + j \sin(\omega t + \theta - \phi) \}$
実部と虚部の2値で表現



I_{rms} : 交流電流の実効値

図2. フェーザ — 正弦波をフェーザ量(実部と虚部の直交する2量)で表現する。

Current denoted in phasor form

N : 1周期当たりのサンプリング数

k : 過去のサンプリングのタイミング

i_{m-k} : $m-k$ 時点の電流瞬時値

音声帯域伝送路を用いる送電線保護リレーでは、伝送周期である電気角120°間隔でフェーザ量が得られればよいため、DFT演算である(2), (3)式で実部及び虚部を算出し、各端子において同一時刻のフェーザ量を算出後、相手端へ伝送して差動電流を算出する。

$$\text{Re}(I_m) = \frac{\sqrt{2}}{24} \sum_{k=0}^{23} i_{m-k} \sin\left(\frac{2\pi k}{24}\right) \quad (2)$$

$$\text{Im}(I_m) = \frac{\sqrt{2}}{24} \sum_{k=0}^{23} i_{m-k} \cos\left(\frac{2\pi k}{24}\right) \quad (3)$$

Re : Real (実部) Im : Imaginary (虚部)

瞬時値形とフェーザ形の性能比較を表2に示す。

表2. 瞬時値形とフェーザ形の比較

Comparison of instantaneous value and phasor denotations

項目		瞬時値形	フェーザ形	
系統現象	DC (直流) 重畳	簡単なフィルタによる影響の低減が可能	基本波抽出原理であり、DC、整数倍調波を減衰	
	過渡状態	事故時ひずみ波	整流加算フィルタ効果で影響低減	上記により影響小
		直列コンデンサ	L分演算影響小	X分算出に影響あり
		CT飽和	差分のひずみ誤差を正確に算出	ひずみ成分の再現精度低下
	インラッシュ	インラッシュ成分抽出用フィルタが必要	同左	
定常状態	基本波	短窓長の高速応答	長窓長のため高精度/低速応答	
	正弦波(非基本波)	抽出周波数に合わせた簡易FIRフィルタが必要	ほぼ同左	
適用面の制約	データ伝送	伝送速度	54 kビット/s以上	54 (kビット/s)/N (N = 3~6)
	前置フィルタ	窓長/演算量	簡易FIRフィルタ	高精度前置フーリエフィルタ

FIRフィルタ : Finite Impulse Response filter
CT : Current Transformer (変流器)
L : インダクタンス
X : インピーダンス (抵抗+リアクタンス)

3.2 μ -law 符号化

伝送データのビット数削減のため、実際に伝送する正相及び零相電流のフェーザ量(実部及び虚部の2量)は、16ビットデータから8ビットデータへの符号化を行う。単純に下位ビットの切捨てで8ビット符号化を行うと、電気量データを12ビットで伝送している現行の送電線保護リレーと比べて、量子化誤差が16倍に悪化するため、ITU-T G.711の μ -lawによる非線形量子化を採用し、入力の数値に応じて量子化ステップを変化させる(切捨て位置を変化させる)方法とし、電力用規格B-402「デジタル形保護継電器および保護継電装置」で規定している許容値($\pm 10\%$ 以内)を満足している。

3.3 伝送フォーマット

1フレームを53ビットで構成するためには、前述の正相電流(I_I)への変更と8ビット符号化だけではデータ量の削減が不十分であるため、動作時間の制約が緩い地絡検出電流差動リレー(87G)用の零相電流(I_0)の伝送を、実部と虚部の交互伝送として8ビットに抑え、伝送データに付加するCRC(Cyclic Redundancy Check:巡回冗長検査)符号を、16ビット長のCRC-ITU-Tから12ビット長のCRC-12へ変更することで、4ビットの削減を図っている。以上の結果から、1フレーム53ビットの内訳は次のようになる。これらの情報で構成する伝送フォーマットを図3に示す。

- フレームヘッダ : 5ビット
- 正相電流データ実部: 8ビット
- 正相電流データ虚部: 8ビット
- 零相電流データ : 8ビット(実部と虚部を交互伝送)
- SA (Sampling Address)フラグ: 1ビット
- 制御情報 : 2ビット
- SP (SamPling)及び同期情報 : 2ビット
- レディビット : 1ビット
- 固定ビット : 6ビット
- CRC : 12ビット

3.4 サンプル同期制御

音声帯域伝送路を用いる送電線保護リレーは、モデムによる音声帯信号の伝送を行うため、伝送路での伝送遅延時

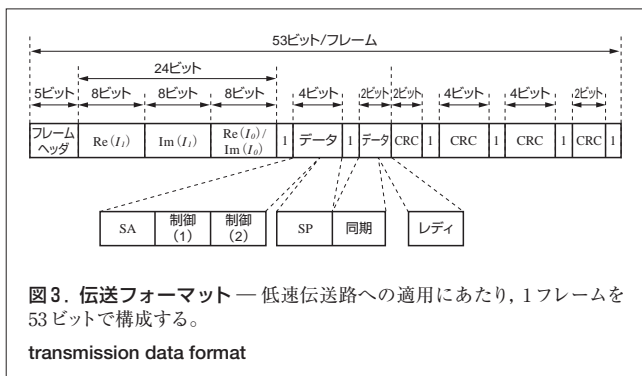


図3. 伝送フォーマット — 低速伝送路への適用にあたり、1フレームを53ビットで構成する。
transmission data format

間に加えて、モデム内での変復調や自動等化器による遅延時間が生じる。自動等化器で生じる遅延時間は設定により変化するが、メタルケーブルや1.5M MUXの音声チャンネルを使用して伝送路を構築する場合、上りと下りを同一経路で同一品質となるようにしたうえで、テストパターン送信による自動等化器の初期設定を行わせることにより、遅延時間を等しくすることができる。これにより、現行の送電線保護リレーと同様の伝送路を使用したサンプリング同期制御を行うことができる。

3.5 伝送不良時の応動

瞬時値を伝送する現行の送電線保護リレーでは、過去の数サンプリングの受信データから振幅値を算出しているため、伝送不良復旧時のリレーロック解除には、振幅値演算窓長+マージンの確認回数を設けている。この確認回数により断続的な単発不良でリレーロックが継続してリレーの稼働率が低下することを抑制するため、単発不良時には全端子の瞬時値電流データを強制的に“0”とするゼロリセット処理を行い、伝送不良が継続したときにリレーロックを行う処理としている。これに対して、直交する2量を伝送している音声帯域伝送路を用いる送電線保護リレーでは、差電流演算や振幅値演算に過去の受信データを必要としないので、ゼロリセットは行わず、伝送不良で即時リレーロック、不良復帰で即時リレーロック解除の処理としている。

4 装置の性能

4.1 最小動作値と比率特性

音声帯域伝送路を用いる短絡検出電流差動リレー(87S)、及び87Gの特性式は(4)~(6)式のとおりで、現行と同一比率特性である。ただし87Sの判定量には正相電流を使用している。

4.1.1 87S 特性式

$$\text{小電流域特性: } |I_{Id}| \geq \frac{1}{5} \sum |I_I| + \frac{4}{5} \text{tap1} \quad (4)$$

$$\text{大電流域特性: } |I_{Id}| \geq \sum |I_I| - 2\text{tap2} \quad (5)$$

$\sum |I_I|$: 両端の正相電流の振幅値和
 I_{Id} : 正相電流の差動電流分
 tap1, tap2 : 87Sの整定^(注2)値

4.1.2 87G 特性式

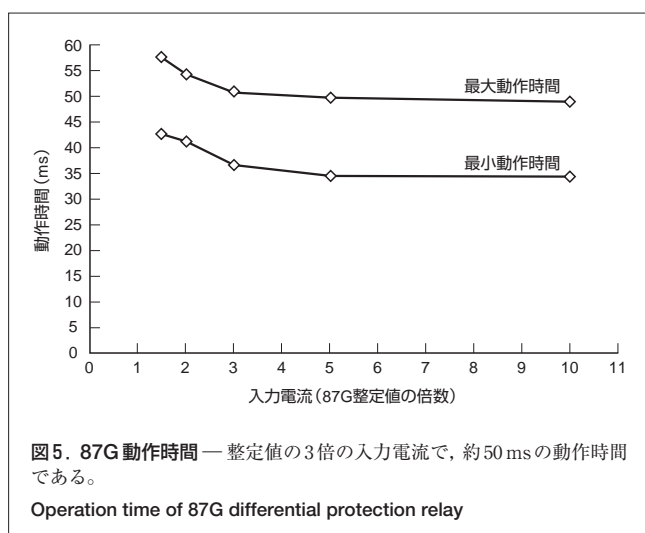
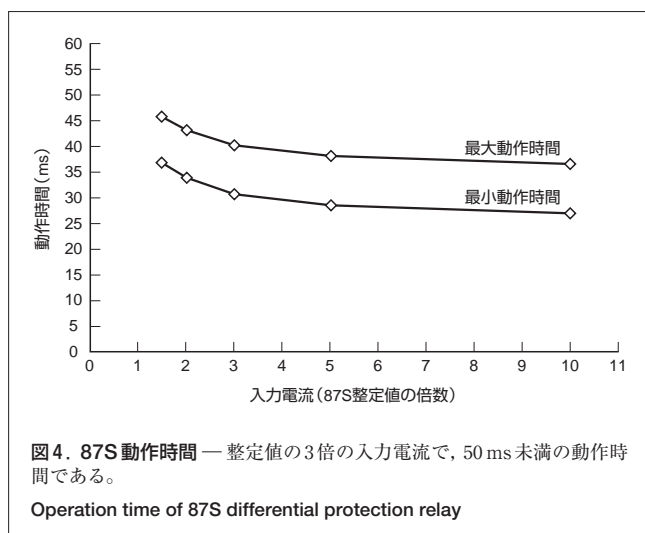
$$|I_{0d}| \geq \frac{3}{17} \sum |I_0| + \frac{14}{17} \text{tap} \quad (6)$$

$\sum |I_0|$: 両端の零相電流の振幅値和
 I_{0d} : 零相電流の差動電流分
 tap : 87Gの整定値

(注2) リレーの動作感度や動作時間などの値を設定すること。

4.2 動作時間特性

音声帯域伝送路を用いる送電線保護リレーは、伝送周期が電気角 120° ごと伝送であること、及びモデムによる約12msの遅延時間が固定的に生じることから、87Sの動作時間は現行より遅くなるが、トリップ指令出力方式を間接トリップ方式から直接トリップ方式へ切り替え、伝送遅延時間の規定値を見直すことにより、短絡事故時の仕上り時間を50ms以内に確保している。87Gは、零相電流を実部と虚部の交互伝送としているため、その分だけ動作時間が遅れる。87Sと87Gの動作時間を図4及び図5に示す。



5 あとがき

音声帯域伝送路を使用する送電線保護リレーを開発した。伝送速度が9600ビット/sの低速伝送への適用のため各種のデータ削減を行っているが、特性面は現行の送電線保護リレーを踏襲し、要求性能を確保している。この装置の実用化により、既存のパイロットワイヤリレーや方向比較リレーからの電流差動リレーへの置き換え時に、光ケーブルのない変電所でも、既存の通信線を使用して送電線保護リレーを適用することが可能である。

なお、この装置は、関西電力(株)と共同で開発した装置であり、関西電力(株)の77kV系統の送電線保護用として順調に稼働している。

文献

- 山田員己, ほか. “低速伝送路を用いた電流差動リレーの開発”. PSR-02-12. 東京, 2002-09, 保護リレーシステム研究会. 電気学会, 2002, p.17 - 22.
- 西山英明, ほか. “高速伝送路を必要としない電流差動リレーの実用化検討”. PPR-04-4. 大阪, 2004-02, 保護リレーシステム研究会. 電気学会, 2004, p.17 - 22.
- 杉浦秀昌, ほか. “低速伝送電流差動リレーの検証結果と評価”. PPR-04-19. 東京, 2004-09, 保護リレーシステム研究会. 電気学会, 2004, p.35 - 39.



大野 博文 OHNO Hirofumi

電力システム社 府中事業所 電力システム制御部主務。
保護・制御システムの設計・開発に従事。
Fuchu Complex



杉浦 秀昌 SUGIURA Hideaki

電力システム社 府中事業所 電力システム制御部主務。
保護・制御システムの設計・開発に従事。
Fuchu Complex



菊崎 朋裕 KIKUZAKI Tomohiro

電力システム社 電力流通事業部 電力系統技術部主務。
保護・制御システムのエンジニアリング業務に従事。
Transmission & Distribution Systems Div.