

# 汎用通信網を適用した送電線保護用電流差動リレーの実用化

Practical Application of Line Current Differential Relay Utilizing Communication Networks for General Use

西田 知敬      森 貴弘      山田 純一      小比賀 勢一

■ NISHIDA Tomonori      ■ MORI Takahiro      ■ YAMADA Junichi      ■ KOHIGA Seichi

送電線保護用電流差動リレー（以下、送電線保護リレーと呼ぶ）は、送電線で発生した落雷などによる事故を検出し、遮断器に対して事故区間の切離し指令を送出する装置であり、電力系統の運用を支えている。この装置は、送電線の各端子の電気量データをPCM (Pulse Code Modulation) 通信を用いて相互に伝送し、全端子の電気量データを用いて差動演算を行い、保護する区間内の事故か区間外の事故かを判定する。従来は、専用通信設備が必要なため、通信設備を含めると高コスト化する課題があった。

東芝と東京電力(株)は、汎用のEthernet<sup>(注1)</sup>通信を組み込んだ送電線保護リレーを世界で初めて<sup>(注1)</sup>開発し実用化した。これにより専用通信設備は不要となり、通信インフラを含めた送電線保護リレーシステムのトータルコストを低減できる。

Line current differential relays contribute to the stable operation of electric power systems by detecting faults, such as lightning faults, and issuing a trip command to circuit breakers in order to isolate faulted network components. This system is capable of detecting whether a fault is an internal or external accident in the area covered by protection through differential calculations using current data from all of the terminals on the transmission line collected via a pulse code modulation (PCM) communication system. Conventional systems of this type therefore require a dedicated communication system, leading to increased costs.

Toshiba and Tokyo Electric Power Company, Inc. have developed a new line differential protection system utilizing a native Ethernet<sup>(1)</sup> communication system without dedicated facilities for the first time in the world. We have put this system into practical use, resulting in cost reductions for communication facilities and the overall system.

## 1 まえがき

送電線保護用電流差動リレー（以下、送電線保護リレーと呼ぶ）は、送電線で発生した落雷などに起因した事故を検出し、遮断器に対して遮断指令を送出することにより事故区間を切り離す装置であり、電力系統の運用を支えている。この装置は、送電線各端子からの電気量データをPCM通信を用いて収集し、同一の時刻にサンプリングされた瞬時値データを用いて、差動演算を行っている。

また、各端子間を結合する伝送路は、電力会社内の専用通信ネットワークを使用するが、上り（受信）と下り（送信）の伝送遅延時間差や伝送遅延時間の少ない、独自の方式が要求される。このため、送電線保護リレー間のデータ通信には専用の通信設備であるキャリアリレー多重変換装置（CR-MUX: Carrier Relay Multiplex Equipment）が必要になり、通信回線を含めたシステム全体の高コスト化の一因となっていた。

一方、民間通信分野では、IEEE 802.3（電気電子技術者協会規格 802.3）によるEthernet<sup>(注1)</sup>通信の標準化、及びインターネットの普及と拡大に伴い、通信回線の高速・大容量化及び通信機器の低コスト化が進んでいる。このため、送電線保護リレーに汎用の通信方式を適用することで、通信回線を含めた

（注1） 2013年1月時点、東芝調べ。

トータルコストの低減と、高速大容量伝送という特長を生かした広域保護システムへの拡張など、発展を期待できる。

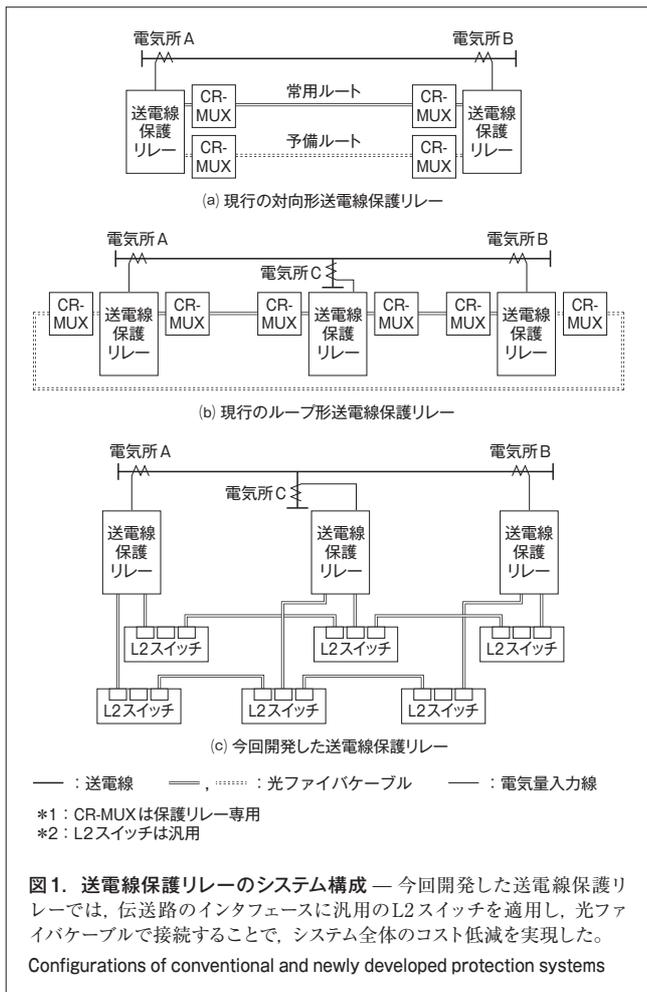
このような背景から、東芝と東京電力(株)は汎用のEthernet<sup>(注1)</sup>通信を組み込んだ送電線保護リレーを世界で初めて開発し、実用化した。ここでは、今回開発した送電線保護リレーの特長とこれを実現するために採用した技術、及び性能を検証した試験の結果について述べる。

## 2 汎用通信方式を適用した送電線保護リレー

### 2.1 システム構成

現行の送電線保護リレーシステムと今回開発した送電線保護リレーシステムの構成を図1に示す。

現行の送電線保護リレーは、伝送路の構成によってシステム構成が異なり、対向形とループ形がある。対向形は、送電線の両端電気所の端子間で伝送路を接続して、差動演算に必要な電気量を収集する。ループ形は、送電線に複数接続する電気所の隣り合う端子間で伝送路をループ状に接続する。この方式では、伝送路の主局（サンプリング同期の基準となる端子）から下り伝送路で電気量を重畳し、上り伝送路から送電線全端子の電気量を収集して差動演算を行う。伝送路は両方式ともに、CR-MUXを介して光ファイバケーブルで構成する。



今回開発した送電線保護リレーでは、汎用通信として国際規格IEEE 802.3のL2 (Layer 2) スイッチによる広域Ethernet<sup>(\*)</sup>を適用し、送電線の各端子間を、1 Gビット/sの伝送速度を適用した伝送路で結合し、差動演算に必要な電流量を収集する構成としている。

### 2.2 システムの特長

- (1) 通信設備を含めたコスト低減 現行の送電線保護リレーには、専用の通信設備と伝送フォーマットによるサイクリック伝送が適用されている。今回開発した送電線保護リレーでは、通信方式として汎用の広域Ethernet<sup>(\*)</sup>を適用し、Ethernet<sup>(\*)</sup>標準の伝送インタフェース及び伝送方式を採用した。これにより、保護リレー専用の通信設備は不要になり、汎用のL2スイッチを適用することで、伝送路を含めたシステム全体のコストを低減できた。
- (2) 高速・大容量伝送の実現 現行の送電線保護リレーの通信速度は1チャンネル当たり対向形で54 kビット/s、ループ形で1.544 Mビット/sであったが、汎用のEthernet<sup>(\*)</sup>通信方式を適用することで、高速・大容量伝送を可能にした。
- (3) 伝送路の冗長化による保護信頼性向上 現行の送電線保護リレーは、運用中の伝送路で障害が発生した場

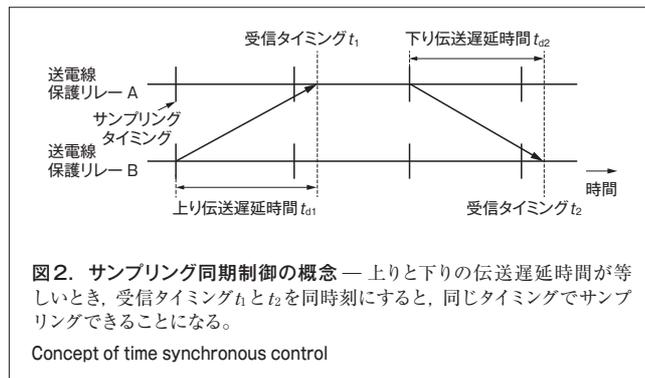
合に、健全系の伝送路へ切替えを行うが、切替中は保護機能を喪失する。今回開発した装置では、伝送路を冗長化し、伝送路単位で差動演算を行うことで、片側の伝送路で障害が発生しても保護機能を維持できるようにし信頼性を向上させた。

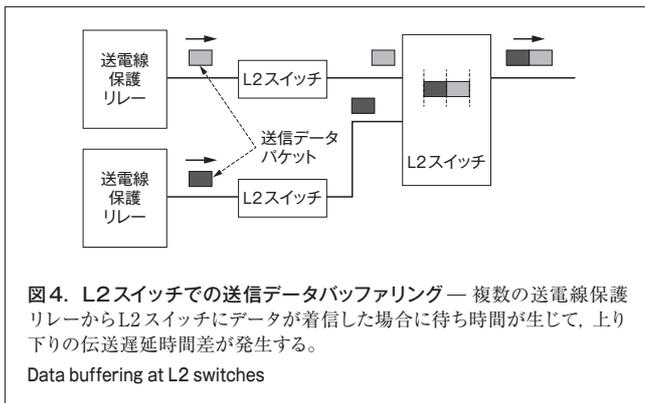
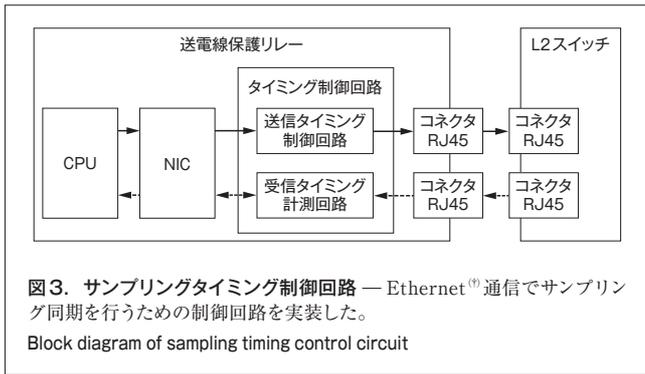
### 3 サンプリング同期方式

送電線保護リレーでは、保護する区間内の事故か区間外の事故かを判定するために、送電線各端子に設置した装置それぞれが同じタイミングで電流量をサンプリングする機能と、サンプリングした電流量データを相互に送受信する機能が必要になる。このため、送電線保護リレーで受信タイミングを計測し送信タイミングを制御することで、サンプリングタイミングを合わせるサンプリング同期制御機能が必要になる。サンプリング同期制御の概念を図2に示す。

汎用通信を適用するうえでの課題と対応について以下に述べる。

- (1) データの送信及び受信タイミングの制御 現行の送電線保護リレーでは、サンプリング同期制御を行うために、データを送信するタイミングと受信するタイミングを制御している。一方、Ethernet<sup>(\*)</sup>通信は、汎用のNIC (Network Interface Controller) を用いたパケット通信方式である。NICでは送信データをメモリに保存した後、Ethernet<sup>(\*)</sup>フレームを生成して、物理層に対してデータ送信処理を行う。また、受信データは、メモリにいったん保存し、所定のタイミングでCPUへ送信する。この場合、送信タイミングと受信タイミングが不定期となるため、このままではサンプリング同期制御を行うことはできない。この問題を解決するため、送電線保護リレー内に送信及び受信タイミングを計測する回路を実装し、サンプリングタイミングの制御を行えるようにした(図3)。
- (2) 上り下りの伝送遅延時間差 送電線保護リレーでは上り下りの伝送遅延時間差が小さいこと、伝送遅延時間が短いことが求められる。しかしEthernet<sup>(\*)</sup>通信の場合



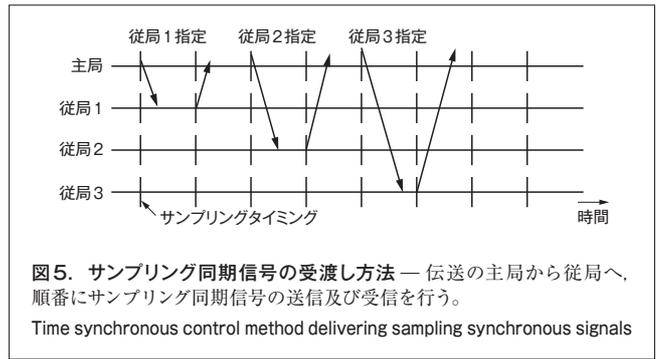


には、同一ネットワークからのデータがL2スイッチに着信するとデータ待ち時間が生じる。この結果、上り下りの伝送遅延時間差が発生し、サンプリング同期誤差に影響を与えることが考えられる(図4)。この問題を避けるために採用した技術を、以下に述べる。

- (a) 1 Gビット/s保護リレー専用通信 伝送速度を1 Gビット/sとすることで、データの衝突確率を削減し、スイッチング時間を高速化するとともに伝送路のトラフィックを極小化した。
- (b) VLAN (Virtual LAN) タグ付きのEthernet<sup>®</sup>フレーム通信 IEEE 802.1Qに準拠したVLANタグ付きのEthernet<sup>®</sup>フレームを採用し、差動演算に使用する電氣量を電氣角30°(周波数50 Hzの場合には1.66 ms)周期で送信する電氣量フレームと、サンプリング同期信号用フレームの2種類を用いることとした。これにより、L2スイッチ内で同期信号用フレームと電氣量フレームが衝突した場合に、VLANタグのプライオリティビットを利用して、同期信号用フレームを優先的に送信することで上り下りの伝送遅延時間差を最小とすることとした。

その他、サンプリング同期信号の送受信は、サンプリング信号の基準信号を送信する端子を主局とし、主局以外を従局として、主局から各従局へ順番に送受信することとした(図5)。

これにより、複数の従局から主局へ同期信号が返送されたときに、データが主局で衝突するのを回避できるようにした。



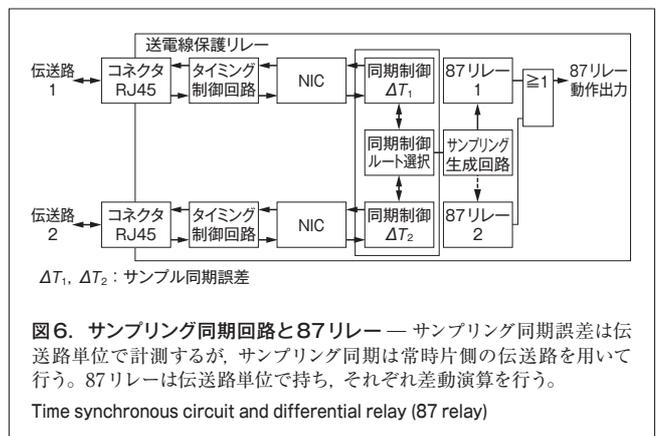
また、主局及び従局は任意に設定可能であり、主局の装置が停止したときには、主局を切り替える機能を実装した。

## 4 伝送路の冗長化構成

今回開発したシステムでは、信頼度向上のため、伝送路を冗長化し、片側の伝送路で障害が発生したときに差動演算を維持できるようにした。サンプリング同期制御を含めたシステム構成を図6に示す。サンプリング同期制御は片側の伝送路を使用して行っているが、両伝送路でサンプリング同期誤差の計算を行うとともに、それぞれに差動演算要素(87リレー)の機能を持たせている。これは、片側の伝送路で障害が発生したときに健全ルートへ切り替える際に、サンプリング同期切替えを瞬時にを行い、差動演算を可能にするためである。これにより、保護信頼度及び装置稼働率の向上が可能になった。サンプリング同期を行っている伝送路に不良が発生したときは、運用を統一するため、全ての端子の伝送路を健全ルート回線へ切り替えることとした。また、サンプリング同期制御の不良検出しきい値は、現行の送電線保護リレーと同様に20 μsとした。

## 5 動作検証試験結果

今回開発した送電線保護リレーの動作検証試験結果の例を以下に述べる。



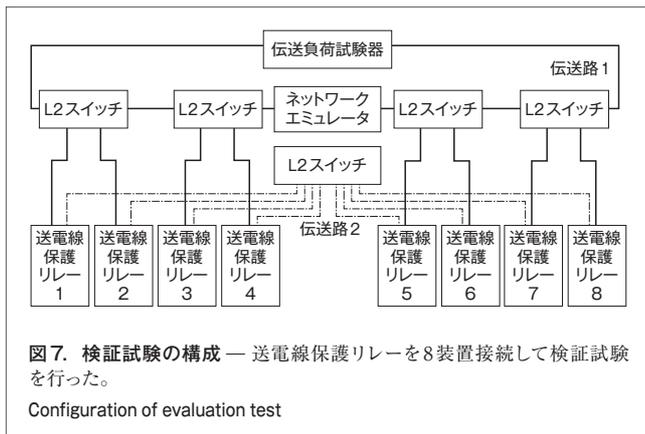


図7. 検証試験の構成 — 送電線保護リレーを8装置接続して検証試験を行った。

Configuration of evaluation test

### 5.1 サンプル同期制御試験

サンプル同期性能について、現行の送電線保護リレー同等の性能を確保しているか確認した。試験回路の構成を図7に示す。

今回開発した送電線保護リレーは、適用可能な送電線の端子数を8端子までとしている。このため、8装置の送電線保護リレーと、L2スイッチ及び伝送負荷を模擬する負荷試験器を接続して試験を行った。この結果、同期誤差の最大値は約 $1.5\mu\text{s}$ であり、現行の送電線保護リレーのサンプル同期不良判定レベル $20\mu\text{s}$ に比べて十分に小さい値であり、必要な性能を満たしていることが確認できた。また、 $1\text{G}$ ビット/sの伝送容量に対して、 $990\text{M}$ ビット/sの伝送負荷（伝送負荷率99%）を重畳したが、サンプル同期不良が発生しないことを確認した。

### 5.2 伝送路の冗長化による評価

伝送路を冗長化することによるサンプル同期制御の切替え及び保護性能を評価するため、次の確認試験を行った。

- (1) 同期ルート切替え試験 伝送路が両系とも正常な状態で、伝送路の伝送不良、送受信回路の不良、及び同期不良を模擬して試験を行った。この結果、模擬した不良のいずれが発生した場合にも、全端子の同期制御ルートが切り替わることを確認した。
- (2) 総合動作試験 送電線保護リレーを模擬送電線試験設備に接続して総合動作試験を行った。その結果、片側の伝送路で伝送不良が発生しても、差動演算を正しく行うことを確認した。

## 6 あとがき

今回開発した送電線保護リレーは、専用の通信設備を不要とし、通信インフラを含めた送電線保護リレーシステムのトータルコスト低減を可能にするものである。また伝送路及び差動演算要素を冗長化することで、信頼性と保護性能を向上させた。

この装置は、東京電力(株)の154 kV送電線保護リレーとして



図8. 開発した送電線保護リレー — 東京電力(株)の154 kV送電線保護リレーとして2013年1月に初納入された。

154 kV line differential protection relay panel of Tokyo Electric Power Co., Inc.

2013年1月に初納入され、安定した稼働を続けている(図8)。この送電線保護リレーは、国内電力会社だけでなく、通信事業者の汎用通信ネットワークを使用している海外の電力会社への適用も可能である。

## 文献

- (1) 電気学会 保護リレーにおける通信利用技術の現状と高度化調査専門委員会. 保護リレーにおける通信利用技術の現状と高度化. 東京, 電気学会, 2013, 技術報告第1276号, 154p.
- (2) 福島将太 他. “イーサネットを適用した送電線保護用電流差動リレーの開発”. 電気学会 保護リレーシステム研究会資料. 東京, 2013-09, 電気学会, 2013, PPR-13-021.

・ Ethernet は、富士ゼロックス(株)の登録商標。



西田 知敬 NISHIDA Tomonori

社会インフラシステム社 電力流通システム事業部 電力システム技術部主務。電力系統保護制御システムのエンジニアリング業務に従事。電気学会会員。

Transmission & Distribution Systems Div.



森 貴弘 MORI Takahiro

社会インフラシステム社 府中社会インフラシステム工場 電力システム制御部。保護継電器の開発・設計に従事。電気学会会員。

Fuchu Operations - Social Infrastructure Systems



山田 純一 YAMADA Junichi

社会インフラシステム社 府中社会インフラシステム工場 電力システム制御部。保護継電装置の開発・設計に従事。電気学会会員。

Fuchu Operations - Social Infrastructure Systems



小比賀 勢一 KOHIGA Seiichi

東京電力(株) パワーグリッド・カンパニー 系統運用部 系統保護グループ副長。電力系統保護制御システムの運用、整定、及び開発に従事。

Tokyo Electric Power Company, Inc.