高抵抗接地系統用ループ伝送多端子 PCM キャリヤリレー装置

正員 坪内 元 孝 (中部電力)
 非会員 伊藤 正 弘 (中部電力)
 正員 滝口 裕 (日立)
 正員 首藤 逸 生 (東 芝)

PCM Carrier Pilot Protective Equipment Applied Loop Transmission Line for Multi-Terminals at Resistance Grounded Neutral System

Mototaka Tubouchi, Member, Masahiro Ito, Non-member (Chubu Electric Power Co., INC.), Hiroshi Takiguchi, Member (Hitachi, Ltd.), Ituo Syutou, Member (Toshiba, Ltd.)

We developed PCM carrier pilot protective equipment for resistance ground neutral system.

This protective equipment uses 1.544 Mbps loop transmission lines.

It features are loop-back control on transmission trouble, preference tripping and differential relay with voltage restraint for branch terminals.

キーワード： PCM キャリヤリレー，多端子送電線，高速伝送，ループバック制御，分岐負荷，インラッシュ対策

1. ま え が き

最近の電力系統の複雑化に伴い送電線保護面の問題として重負荷送電線，多端子系統，ケーブル系統の増大などがあり保護性能のよりいっそうの向上が求められている。

この対応として，近年の情報伝送技術の進歩に相まってPCM(Pulse Code Modulation)キャリヤリレーが開発実用化され，我が国の基幹系送電線の主保護リレーに適用し，約10年に及ぶ使用実績から他の送電線リレーをしのぎ，揺るぎない地位を築いている。

これまで主に経済性面の制約から超高压以上の系統に限定される傾向にあったこの装置は，動作原理が最も簡潔で事故区間検出性能が優れていることから，154 kVおよび低位系統への適用が求められていた。一方，近年のデジタル伝送路の拡大，OPGW(光ファイバ複合架空地線)の普及などにより，154 kV以下の高抵抗接地系統用多端子PCMキャリヤリレーの開発実用化の気運が高まっている。

本論文では，超高压系送電系統にない低位系送電線固有の端子数増大への対応性，信号端局装置の省略化などをねらいに，1.544 Mビット/sの伝送速度を用いて2回線一括形高抵抗接地系統用ループ伝送多端子PCMキャリヤリレー装置を開発実用化したので，この内容につき報告する。

2. 高抵抗接地系統用ループ伝送多端子 PCM キャリヤリレー装置のシステム概要

〈2・1〉 システム構成 並行二回線5端子系統へ適用した場合のシステム構成を図1に示す。各端子で収集した

図1 システム構成

Fig. 1. Carrier pilot protective systems for 154 kV parallel power lines.

図 2 システム構成
Fig. 2. Carrier pilot protective systems for 77 kV parallel power lines.

図 3 154 kV 系統用装置外観
Fig. 3. A general view of protective equipment for 154 kV parallel power lines.

2 回線分の電流データを、1 ルートの光伝送路で送受信するための多重化伝送ユニットを装置内に具備し、デジタル一次群に相当する伝送速度 1.544 M ビット/s の信号で全端子の電流データの伝送を行っている。

伝送路は、図 1 の実線で示す常用伝送路と破線で示す特定区間の予備伝送路（仮想オフルート）とを備え、常用伝送路が正常な場合は、予備伝送路をオープンとし、データ

表 1 154 kV 系統用リレー装置の保護方式
Table 1. A protection scheme of protective equipment for 154 kV parallel power lines.

主保護	短絡	各相差動リレー方式
	地絡	零相差動リレー方式
	再閉路	優先遮断付 高速度 3 相再閉路
後備保護	短絡	距離リレー方式 (1~3 段)
	地絡	地絡方向リレー方式

表 2 77 kV 系統用リレー装置の保護方式
Table 2. A protection scheme of protective equipment for 77 kV parallel power lines.

主保護	短絡	各相差動リレー方式 (分岐負荷対策付)
	地絡	零相差動リレー方式
後備保護	短絡	距離リレー方式 (1~3 段)
	地絡	地絡方向リレー方式

伝送には使用しない。これに対し、万一常用伝送路に伝送不可能な区間が生じたときにはその区間をオープンに切り換え、それまで仮想オフルートとなっていた正常時のオープン区間を閉じるように自動的に制御し、リレー運用を継続できるように構成している。

保護リレー部については、図 1 に示すように回線ごとに分離構成した 154 kV 系統用と図 2 のように、2 回線一括処理を可能とした 77 kV 系統用について開発実用化した。

〈2・2〉 装置構成 154 kV 系統用装置の 1 端局分の装置外観を図 3 に示す。送電線 2 回線につき主保護 1 面（盤幅 700 mm）、後備保護 2 面（盤幅 350 mm）で構成している。

保護方式の仕様を 154 kV 系統用および 77 kV 系統用について各々表 1、表 2 に示す。154 kV 系統用リレー装置には、2 回線同時事故時のルート断防止に効果のある優先遮断付き高速度再閉路機能を備えている。

77 kV 系統用リレー装置には、保護区間内の端子扱いとしない配電用変電所などの途中分岐があっても、リレー運用を可能とした差動リレーを開発適用した。

3. 信号伝送方式

〈3・1〉 伝送路構成と各端子データの流れ 伝送路構成については、図 4 に示すように予備伝送路のないオープンループ方式、および予備伝送路を備えたループ方式のいずれにも対応できるようにしている。

ループを構成した場合は、あらかじめ設定しておいた親局～折返し局間の伝送路を予備伝送路として扱い、予備伝送路の健全チェックは実施するが、予備伝送路上の伝送データではリレー演算をしない論理上の仮想 OFF として扱っている。各端子の伝送データの流れを図 5 に示す。

親局である A 端よりフレームフォーマットを発生し、右向き（伝送路（下りルート）により途中の端子を通過することにより順次決められた位置に各端子のデータを付加することにより電流データを収集する。子局である E 端にて折

り返した上りルートにより収集した電流データを各端子に伝送する。この上りルートの伝送信号は全端子の電流データを含んでいるので、リレー判定 (87) はすべての端子で可能である。この様相を図 6 に代表として 1 相のみで簡略化して示す。

〈3・2〉 常用伝送路異常時の対応 常用伝送路に伝送不可能な区間が生じたときの対応として、予備伝送路を備えるループ方式において、異常となった区間をオープンに切り換え、それまで仮想オフルートとなっていた正常時のオープン区間を閉じるよう自動的に制御するループバック制御を行い、リレーシステムとして運転を継続するようにしている。このループバック制御の様相を図 7 に示す。予備伝送路以外の常用伝送路のある区間に伝送路不良が一定時間継続した場合、伝送路不良を検出した端子が仮親局となり、ループバック制御を開始し、オープンループ方式の伝送路を自律構成する。ループバック制御後は、仮親局、仮中間局、仮折返し局にて運用するが、すべての伝送路障害が復旧したことが確認されたならば、ループバック切戻し制御を実施し、あらかじめ設定しておいた親局から折返し局の構成に戻るようにしている。

図 4 伝送路構成
Fig. 4. Construction of transmission line.

オープンループ伝送路の場合には、仮想オフルートがない状態に相当し、このループバック制御を不使用とすることにより適用可能としている。

〈3・3〉 信号伝送方式 伝送速度として標準のデジタル一次群 (1.544 M ビット/s) を使用し、サンプリング同期制御については下りルート送信開始から、上りルートでの受信までの遅延時間を利用したサンプリング自動同期制御を各端子ごとに実施しており、各端子間に伝送遅延時間がある場合でも各端子のサンプリング時刻を高精度 (同期精度 20 μ s 以下) に一致させることが可能である。この自動同期補償可能な最大伝送遅延時間は、下り上り往復で 10 ms である。

同期確立時間は、3 秒以内に確立する仕様としている。伝送フォーマットを図 8 に示すが、各端子データフレームを二回線 8 端子合計 16 端子まで適用可能とした。伝送フォーマット上 7 ビットごとに固定ビットを 1 ビット故意に挿入したフレーム構成としている。

図 6 各端子データの流とリレー判定の様相
Fig. 6. Flow of transmission terminal data and the situation of relay tripping decision.

図 5 各端子の伝送データの流
Fig. 5. Flow of transmission terminal data.

図 7 ループバック制御の様相
Fig. 7. Loop-back control.

図 8 伝送フォーマット
Fig. 8. Transmission data format.

・ インターフェース条件

項 目	仕 様
光 変 調 方 式	光強度変調
符 合 化 形 式	CMI
伝 送 速 度	1.544Mbps ± 77bps
発 光 素 子	LD
発 光 波 長	1.31 μm ± 0.03 μm
出 力 レ ベ ル	-10dbm + 光ATT (-16dbm以上) (平均値)
受 光 素 子	Ge-APD
入 力 レ ベ ル	-18~-43dBm (平均値)
光ファイバケーブル	SM 10/125
コ ネ ク タ	FCコネクタ

図 9 通信側伝送路を介して光直結する場合
Fig. 9. Direct optical link.

・ インターフェース条件

項 目	仕 様
伝 送 速 度	1.544Mbps ± 77bps
パ ル ス 信 号 形 態	平衡パルス信号
符 合 形 式	バイポーラ AMI
インピーダンス	110 Ω, 平衡
送 信 出 力 波 形	右図のパルスマスクを満足すること
信号スペクトラムレベル	772kHzで+12~-19dBm
受 信 信 号 レ ベ ル	上記波形を専用PCMケーブルで0~200m伝送した波形を受信可能

図 10 通信側デジタル二次群多重化装置と電気信号で結合する場合
Fig. 10. Electrical link to 6M multiplex equipment.

・ インターフェース条件

項 目	仕 様
光 変 調 方 式	光強度変調
符 合 化 形 式	CMI
伝 送 速 度	1.544Mbps ± 77bps
発 光 素 子	LED
発 光 波 長	1.30 μm ± 0.05 μm
出 力 レ ベ ル	-19~-24dBm (平均値)
受 光 素 子	pinフォトダイオード
入 力 レ ベ ル	-19~-33dBm (注) (平均値)
光ファイバケーブル	G1 50/125
コ ネ ク タ	FCコネクタ

図 11 通信側 1.5 M CR-TRM と結合する場合
Fig. 11. Optical link to 1.5 M carrier terminating set.

伝送不良の検出機能として次の監視を行っている。

- (i) CRC チェック：CRC(Cyclic Redundancy Check)コードを伝送し、受信側でチェックする。
- (ii) 固定ビットチェック：データフレーム上の固定ビットの有無をチェックする。
- (iii) フレーム同期：フレーム同期パターンが順序どおり受信されるかをチェックする。
- (iv) マルチフレーム同期：マルチフレーム No. が順

序どおりであるかをチェックする。

- (v) 受信断：受信信号の有無をチェックする。
  - (vi) サンプリング同期不良：サンプリングのタイミングが 20 μs 以上ずれていないかをチェックする。
  - (vii) サンプリングアドレス同期不良：サンプリングアドレスが順序どおり受信されるかをチェックする。
- 伝送系との入出力インターフェースは、次のとおり結合形態を考慮して光信号および電気信号双方の仕様に対応でき

るようにしている。

- 〈形態 1〉 リレー装置間を通信側光伝送路 (OPGW) を介して光直結とする場合
- 〈形態 2〉 通信側デジタル二次群多重化装置 (6 M-MUX) と電気信号で結合する場合
- 〈形態 3〉 通信側デジタル二次群多重化装置と結合する際に通信側 1.544 Mbps 回線終端装置 (1.5 M CR-TRM) を介して結合する場合

各々の伝送系との結合形態およびインタフェース条件を図 9～図 11 に示す。このうちリレー装置間の光直結方式の実用化により、これまで市内系の送電線保護として表示線を用いたパイロットワイヤリレー装置があるが、この装置の性能改善代替品として今後広く応用展開されてゆくものと考えられる。

4. 保護方式面での改善内容

〈4・1〉 再閉路方式の性能改善 154 kV 系統用リレー装置には、2 回線同時事故時のルート断防止のため優先遮断付高速度三相再閉路方式を適用している。これは、2 回線にまたがる多重事故時に重故障回線または特定回線を優先遮断し、遮断回線の再閉路実施後非優先回線の遮断および再閉路を実施する方式であり、ルート断防止の期待効果

表 3 新規採用優先遮断方式
Table 3. New preference tripping system.

No	故障の状態	優先条件	遮断方式			
			可変電源端 A 端故障	可変電源端 B 端故障	電源端 C 端故障	可変電源端 D 端故障
1	1 線 - 1 線 (同相故障)	指定回線	回線優先	同 左	同 左	同 左
2	1 線 - 1 線 (異相故障)	指定回線	回線優先	同 左	同 左	同 左
3	2 線 - 1 線 (2 相故障)	2 線故障回線	重故障優先	同 左	同 左	同 左
4	2 線 - 1 線 (3 相故障)	2 線故障回線	重故障優先	同 左	重故障優先	同 左
5	2 線 - 2 線 (2 相故障)	(なし)	両回線	同 左	同 左	同 左
6	2 線 - 2 線 (3 相故障)	(なし)	両回線	同 左	同 左	同 左
7	3 線 - 1 線 (3 相故障)	3 線故障回線	重故障優先	同 左	重故障優先	同 左
8	3 線 - 2 線 (3 相故障)	(なし)	両回線	同 左	同 左	同 左
9	3 線 - 3 線 (3 相故障)	(なし)	両回線	同 左	同 左	同 左

表 4 従来形優先遮断方式
Table 4. Previous preference tripping system.

No	故障の状態	優先条件	遮断方式			
			可変電源端 A 端故障	可変電源端 B 端故障	電源端 C 端故障	可変電源端 D 端故障
1	1 線 - 1 線 (同相故障)	1 号線	回線優先	同 左	同 左	同 左
2	1 線 - 1 線 (異相故障)	進相故障回線	進相優先	同 左	同 左	同 左
3	2 線 - 1 線 (2 相故障)	2 線故障回線	重故障優先	同 左	同 左	同 左
4	2 線 - 1 線 (3 相故障)	(なし)	両回線	同 左	重故障優先 (27L 不付)	同左 (27L 付)
5	2 線 - 2 線 (2 相故障)	(なし)	両回線	同 左	同 左	同 左
6	2 線 - 2 線 (3 相故障)	(なし)	両回線	同 左	同 左	同 左
7	3 線 - 1 線 (3 相故障)	(なし)	両回線	同 左	重故障優先 (27L 不付)	同左 (27L 付)
8	3 線 - 2 線 (3 相故障)	(なし)	両回線	同 左	同 左	同 左
9	3 線 - 3 線 (3 相故障)	(なし)	両回線	同 左	同 左	同 左

が大きい。従来、154 kV 系統用として方向比較キャリヤリレー装置でこの方式を適用していたが、PCM キャリヤリレー化による各相差動の採用により、事故相を正確に検出できる優先遮断判定ケースの増加改善が図られている。この様子を、従来の優先遮断方式との対比で表 3 および表 4 に示す。表中ケース No. 4, 7 の 2 線-1 線および 3 線-1 線故障が改善されている。

〈4・2〉 77 kV 系途中分岐負荷対策 77 kV 系送電線には、途中に配電用変電所が接続されており、特に CB を設置せず LDS で受電する箇所では、端子化すると母線故障の対応など全体のシステムが複雑になるなどの問題があり、端子扱いとしないほうが望ましいことがある。このように端子扱いとしない途中分岐負荷が保護区間内にある場合には、下記を考慮することが必要である。

- (i) 分岐負荷電流が常時差電流となるが、これによりリレーが動作しないこと。
- (ii) 分岐負荷変圧器二次側故障の故障電流が差電流となり、これにより動作しないこと。
- (iii) 分岐負荷変圧器のインラッシュ電流により動作しないこと。
- (iv) 保護区間内故障では、確実に動作すること。

これらの各項目に対して次のような考え方をもとに、新たに差動リレーに電圧抑制を付加したリレーを開発実用化した。

(i) 項に対しては、最大の分岐負荷電流よりも区間内最小故障電流のほうが大きいことが要求されるが、これを満たさない系統はほとんどない。

(ii) 項に対しては、区間内最小故障電流よりも分岐負荷変圧器二次側故障電流のほうが場合によっては、大きくなる。

しかし、分岐負荷変圧器二次側故障電流が大きくなれば同時に背後短絡容量も大きくなっている。つまり、差電流

図 12 電圧抑制付差動リレーの特性
Fig. 12. Characteristic of differential relay with voltage restraint.

表 5 適用限界検討例
Table 5. Application Limit Example.

区間内最小故障電流 区間内最大分岐負荷電流	1.8 以上	
区間内最小故障短絡電流	1.5 A 以上	
短絡故障時の相電圧低下幅	10 V 以上	
適用可能線路インピーダンス	2%以下	at 10 MVA ベース
区間内分岐負荷バンクインピーダンス	5%以上	at 10 MVA ベース
区間内分岐負荷バンクインラッシュ 時の等価励磁インピーダンスを並列 合成した総合励磁インピーダンス	5%以上	等価励磁インピー ダンス*1
区間内外部故障時の最大流出電流 区間内最小故障電流	4 以下	多端子系統のとき

* 1 等価励磁インピーダンス

$$\%ZT_{in} = \frac{10 \times 2\sqrt{2}}{P \times N} \times 100 (\%)$$

P: 変圧器定格容量 (MVA)

N: 変圧器のインラッシュ電流波高値の定格電流実効値に対する倍数

と電圧降下の関係は、等価電源端子から事故点を見たインピーダンスにほぼ反比例し、背後電源容量に比例するため分岐負荷変圧器インピーダンス ≧ 線路インピーダンスの関係があれば、差動リレーの検出感度に電圧抑制を付加することにより、分岐負荷変圧器二次側故障と区間内故障との判別が可能である。

(iii)項に対しては、送電端子投入時の分岐負荷変圧器のインラッシュ電流の大きさは、背後系統容量に比例するため区間内の分岐負荷変圧器の並列合成励磁突入インピーダンス ≧ 線路インピーダンスの関係があれば、電圧抑制を付加することにより、インラッシュ電流と区間内故障電流との判別が可能である。

これらの考え方にに基づき開発した電圧抑制付差動リレーの特性を図 12 に示す。

差動リレーは、感度上の配慮から動作電流は相電流 (Y) で差動原理をくみ、電圧抑制量は短絡故障時電圧低下量の大きい線間電圧 (Δ) を使用した。この抑制電圧は回線間にまたがる 2 線故障でも遅れ相のリレーの感度低下を防止するため、自端子線間電圧の隣合う 2 辺の線間電圧のうち、小さいほうの電圧を抑制電圧とした。

以上の分岐負荷対策用電圧抑制付差動リレーの系統上の適用限界検討例を表 5 に示す。

5. あとがき

以上、高抵抗接地系統用ループ伝送多端子 PCM キャリヤリレー装置の開発実用化の内容につき述べた。

これまで、主に経済性面の制約から PCM キャリヤリレー装置は、超高圧以上の系統に限定される傾向にあったが、低位系統用として高速デジタル伝送技術の採用により、多端子二回線一括保護の具体化および信号端局装置の省略化などによる経済性面でのメリットのあるシステムが構築できたものと考えている。また、リレー装置間の光直結技術は今後市内系の送電線保護用として従来のパイロツ

トワイヤーリレーの代替装置としてブラッシュアップを図らねながら適用されてゆくものと考えられる。

保護リレーシステムは、きわめて重要な使命をになっているので、これまでも常に信頼性に配慮した開発を進めてきたが、今後とも電力の安定供給という視点に重点を置き、この分野の技術開発に努力してゆく考えである。

終わりに、本論文で述べたシステムの開発にあたっては関係各位の御理解と御指導に負うところが大きく、深謝の意を表す次第である。 (平成 5 年 11 月 29 日受付)

文 献

- (1) 山下, 他: 「高抵抗接地系統用デジタル電流差動キャリヤリレー装置の開発」, 平 3 電気学会全大, No. 1410
- (2) 香田, 他: 「77 kV 多端子系統保護用 PCM 電流差動リレーの開発」, 平 3 同上, No. 1409
- (3) 久保, 他: 「電力系統保護・制御システムの技術動向」, 日立評論, 73, No. 6, 31(平 3)

坪 内 元 孝 (正員) 1956 年 6 月 23 日生。1980 年 3 月東京工業大学工学部電気電子工学科卒業。同年 4 月中部電力(株)入社。現在、長野支店工務部発電電課勤務。保護制御装置の拡充・改良工事に従事。

伊 藤 正 弘 (非会員) 1957 年 2 月 22 日生。1975 年 3 月津工業高校電気科卒業。同年 4 月中部電力(株)入社。現在、本店系統運用部系統技術グループ勤務。保護制御装置の開発に従事。

滝 口 裕 (正員) 1953 年 7 月 2 日生。1974 年 3 月旭川工業高等専門学校卒業。同年 4 月(株)日立製作所入社。現在、国分工場にて保護継電装置の開発設計に従事。

首 藤 逸 生 (正員) 1954 年 3 月 25 日生。1978 年 3 月東京工業大学大学院エネルギー工学科修士過程修了。同年 4 月(株)東芝入社。現在、府中工場にて保護継電器の開発設計に従事。