エージェントモデルによる協調動作型保護システムの コンセプト

正員 富田 泰志 (日立製作所)
 正員 福井 千尋 (日立製作所)
 正員 工藤 博之 (日立製作所)
 正員 香田 潤 (東京電力)
 正員 矢部 邦明 (東京電力)

The Concept for Cooperative Protection System with Agent Model

Yasushi Tomita, Member (Hitachi, Ltd.)

Chihiro Fukui, Member (Hitachi, Ltd.)

Hiroyuki Kudo, Member (Hitachi, Ltd.)

Jun Koda, Member (Tokyo Electric Power Co.)

Kuniaki Yabe, Member (Tokyo Electric Power Co.)

This paper proposes a new concept of relay agent to realize cooperative protection system, which consists of distributed equipment that are combined with communication network and cooperate to realize adaptive protection functions. Relay agents move between equipment to utilize data and functions installed distributively. The paper classified relay agents by its roles and simulated protection functions under some typical conditions. This indicated that the concept enables the protection system to keep isolated zone minimum against any changes in power system conditions and to secure high reliability of the protection system with less redundant hardware. The concept of relay agent will give a powerful means of advanced protection functions by combination of micro processor technology and information communication technology.

キーワード：保護システム，保護リレー，協調動作，エージェントモデル，リレーエージェント

1. はじめに

保護リレーシステムは、電力系統内の事故を高速かつ確実に検出して、その影響が系統全体に波及するのを防ぐために、最小限度の範囲を遮断するものである。基本的には、遮断範囲最小化に重点をおく主保護リレーと、主保護失敗時の確実なバックアップ遮断を主眼とする後備保護リレーの2重化構成により、高精度・高信頼性を実現してきた。保護ロジックとして、主保護リレーには事故区間判別能力に優れた電流差動方式が、後備保護リレーにはローカル情報のみで動作可能という利点を持つ距離リレー方式が広く採用されている。

しかし、距離リレーは区間判別能力に劣るため遮断範囲が広範囲に及ぶ場合もあり、また主保護リレーなどとの協調を時限協調に依っているため事故除去の高速化には限界

がある。

また、電力自由化の急速な展開やさらにはFACTS機器の導入などにより、電力系統は益々複雑化し、系統構成や潮流状態が大きく変化して、事故状況を的確に把握することが困難になると予想される。このとき特に広域の保護範囲を対象とする後備保護への影響は大きく、主保護リレー誤不動作時、遮断器誤不動作時などのバックアップ保護時に追加速断範囲を最小限度に留めることは困難になる。

これに対し、系統状態の変化に対応して、保護リレーの動作特性や整定値を自動的に調整することにより、保護能力を向上させるアダプティブ保護の概念が提案されているが⁽³⁾⁽⁴⁾、時限協調などの考え方を大きく変えるまでには至っていない。

本研究は、後備保護の高度化として、以下の特徴を持つ

ーシステムを実現するかを主題とし、これ以上エージェント処理機構については触れない。

<2.2> リレーエージェントの構成

前節の枠組みに従ってリレーエージェントを構成する。各タイプの代表的な例を表1に示す。

表1 代表的なリレーエージェントの例
Table 1. Typical Examples of Relay Agent

エージェント名	概要
設備エージェント	
送電線エージェント	周期的に充電電流を計算
母線エージェント	母線に固有のデータと機能を管理
CTエージェント	電流値を観測 CT障害・回復を検出し保護体エージェント再編成を行う自己再編エージェントを派遣
PTエージェント	電圧値を観測 PT障害・回復を検出し保護体エージェント再編成を行う自己再編エージェントを派遣
CBエージェント	遮断器の開閉状態を監視 CB開放・投入を検出し保護体エージェント再編成を行う自己再編エージェントを派遣
機動エージェント	
CTデータ収集エージェント	与えられたCTエージェントの持つ電流値データを派遣元に定期的に転送
PTデータ収集エージェント	与えられたPTエージェントの持つ電圧値データを派遣元に定期的に転送
充電電流データ収集エージェント	与えられた送電線エージェントの持つ充電電流データを派遣元に定期的に転送
CB遮断エージェント	与えられたCBエージェントに開放を指示 誤不動作時は与えられた方向の隣接CBエージェントに開放を指示
CT探索エージェント	与えられた設備エージェントから与えられた方向の与えられた距離にある全てのCTを探索
CB探索エージェント	与えられた設備エージェントから与えられた方向の与えられた距離にある全てのCBを探索
保護体エージェント	
監視体エージェント	監視対象区間内の差電流を計算して事故の有無を判別
遮断体エージェント	監視体が事故を検出した時に事故区間を切り離すCBの開放を起動
自己再編エージェント	
CB開放適応エージェント	開放CBを監視対象区間の内部に持つ監視体エージェントを開放CBで分割
遮断体再編成エージェント	与えられた監視体エージェントの監視対象区間を最小範囲で遮断する遮断体エージェントを生成

3. 動作ロジック

保護システムとして代表的な機能である、主保護機能、遮断器誤不動作時のバックアップ保護機能、遮断器開放による系統構成変化時のアダプティブ保護機能を取り上げ、それらを実現する主なリレーエージェント群の協調動作ロジックを述べる。

<3.1> 監視区間と遮断区間

保護機能について遮断範囲の最小化を議論するため、幾

つかの概念の定義を明確にしておく(図2参照)。

事故検出範囲(以下、監視区間と呼ぶ)は、差電流計算に必要な電流データや電圧データを観測するセンサもしくは開放端によって囲まれる範囲として定義される。極小の監視区間は、その内部に別の監視区間を含まないものとして定義される。

また、事故遮断範囲(以下、遮断区間と呼ぶ)は、遮断器あるいは開放端によって囲まれる範囲として定義される。極小の遮断区間は、その内部に別の遮断区間を含まないものとして定義され、これは内部に別の遮断器や開放端を含まない遮断区間である。しかし、遮断区間は事故が検出された監視区間を切り離すことができ意味を持つ。即ち、遮断区間が意味を持つのは、その内部に含まれる監視区間が存在するときである。

本論文で提案するアダプティブな保護機能は、系統状態に応じて、任意の監視区間に対し、それを内部に含む遮断区間のうちで最小のものを対応付けるものである。

<3.2> 基本的な事故監視機能

図3に事故監視機能を実現する主なエージェント群の協調動作の概要を示す。

監視体エージェントは監視区間の差電流を計算し、監視対象が送電線の場合は充電電流補償を行って事故電流の検出を行う。差電流計算に必要な監視区間の境界の電流値データについては、監視区間の境界のCTエージェントが実設備の電流センサ(CT)の電流値を常時観測して取り込み、これをCTデータ収集エージェントが定期的に監視体エージェントへ転送する。充電電流データについては、送電線エージェントが常時その両端のPTエージェントから電圧データを取り込んで充電電流を計算し、これを充電電流データ収集エージェントが監視体エージェントへ転送する。監視体は事故電流が検出された場合に監視結果を遮断要と結論する。

図2 監視区間と遮断区間
Fig.2. Watched zone and isolated zone

<3.3> 基本的な事故遮断機能

監視体エージェントの監視結果が遮断要となった場合の事故遮断を起動するのは遮断体エージェントである。図4に事故遮断機能の実現の概要を示す。

遮断体エージェントは監視体エージェントを常時監視しており、監視体エージェントの監視結果が遮断要となった場合に境界の遮断器の開放を起動する。境界の遮断器(CB)の開放は遮断体エージェントから派遣されるCB遮断エージェントが遮断体エージェントから指示されたCBエージェントへ遮断命令を転送し、CBエージェントが実設備のCBへ遮断信号を転送することで実現される。また、CB遮断エージェントはCBの動作結果をその直近のCTエージェントの電流値データが0であるかどうかによって判定する。そのため、CB遮断エージェントは直近のCTエージェントを探査するCT探索エージェントを派遣する。CT探索エージェントは遮断命令を与えたCBエージェントを出発点として、その隣接設備エージェントへ順に辿って、最初に到着するCTエージェントを直近のCTエージェントとして探索する。

遮断体エージェントが対象とする遮断器は遮断区間の最小化を実現するものである必要がある。最適な遮断区間は監視体エージェントの対象とする監視区間を内部に含む遮断区間のうちで最小のものとして一意に定まる。その設定方法については3.5節で議論する。

<3.4> CB 誤不動作時バックアップ機能

遮断しようとしたCBが誤不動作の場合に必要な最小限の追加遮断を行う主なリレーエージェント群の協調動作の概要を図5に示す。これは接続母線切替中で甲乙両母線に接

続されている送電線で事故があり、さらに遮断失敗があったケースである。

CB 遮断エージェントが誤不動作CBの1つ外側の直近のCBを探査し遮断することにより、必要最小限の追加遮断を実現することは明白である。探索処理は系統のネットワーク情報を実装している設備エージェント間のリンクを1つずつ辿ることで実現される。設備エージェントが系統状態を常時監視しているため、如何なる系統状態に対しても的確に追加遮断CBを探査することができる。

このような探索処理で課題となるのは、探索ルート中に分岐やループがある場合である。途中に分岐がある場合は、分岐点で各分岐方向に自分のコピーを派遣して、自分

図4 事故遮断を実現する主なエージェント群の作用
Fig.4. The operations of main agents for trip

図3 事故監視を実現する主なエージェント群の作用
Fig.3. The operations of main agents for fault detection

図5 遮断器誤不動作時の主なエージェント群の作用
Fig.5. The operations of main agents for failure to trip of CB

はそこでとどまってコピーの結果報告を待つことで解決できる。各コピーはCBや開放端に到達したら探索を終了しオリジナルに結果を報告する。ループの場合は、分岐したコピーが二手に分かれて探索し、お互いの探索ルートが再度交わることになる。これに対しては、例えば、探索途上の各設備エージェントにCB遮断エージェントのオリジナルのIDを残しておくことで、各コピーは既に探索済かどうかを判断できる。既に探索済の設備エージェントに到着したら探索を終了しオリジナルに結果を報告する。このようにして、あるコピーは開放端に到着して消滅し、あるコピーはCBへ到着して、そのCBを遮断する。結果として得られる追加遮断範囲は、当初の遮断区間に対して必要最小限になっている。

<3.5>CB開放時アダプティブ機能

系統状態変化の代表的な例であるCB開放による系統構成変化に対するアダプティブ機能について考察する。

例えば図6のようにCBとCTの間で事故が発生した場合、CBが投入されているか開放されているかによって、その最小の遮断範囲は異なってくる。CBが投入されている場合、事故点を含む最小の監視区間はそのCBを含み、そのCBのどちら側で事故が起こったかは認識できないため、両側とも遮断せざるを得ない。一方、CBが開放されている場合、監視区間の境界として開放CBを利用することで最小の監視区間をその開放CBと事故点側のCTで囲まれる範囲とすることができ、開放CBの事故点側のみを遮断することが可能になる。

リレーエージェントのコンセプトは、如何なる系統構成の変化にも的確に対応して、系統に設置された設備を最大限に活用して事故時の遮断範囲を局限化することを可能にする。図6に従って主なリレーエージェント群の協調動作の概要を示す。

監視区間の内部に含まれるCBが開放された場合、開放CBを電流値0を与える電流センサと見做すことにより監視区間を細分化して事故区間の判別能力を向上させる。これは、監視区間を開放CBにより2つに分割し、分割前の監視区間を対象とする監視体エージェントを分割後の2つの監視区間を対象とする2つの監視体エージェントに分解することによって実現できる。また、監視体エージェントの分解に伴い、分解によって得られたそれぞれの監視区間について、それを内部に含む遮断区間のうちで最小のものを対象とする遮断体エージェントに分解する。これによって、細分化された監視区間に対応して、事故時の遮断範囲を最小化することができる。

具体的には、まず開放CBに対応する設備エージェントがCB開放を検出し、CB開放適応エージェントを生成する。CB開放適応エージェントは開放CBを中心として、それぞれの方向について、直近のCTと開放CBを境界とする監視体エージェントを生成する。これが監視体エージェントの分解である。また、分解によって得られたそれぞれの監視体エージェントに対して、その境界CTの監視区間

の外側の直近のCBを遮断対象とする遮断体エージェントを生成する。これが遮断体エージェントの分解である。

4. 考察

現用システムと比較しながら、遮断範囲局限化、高信頼性、情報収集能力、動作時間について考察する。

<4.1>遮断範囲局限化に関する考察

3.4節、3.5節では、具体的な遮断器誤不動作例や系統構成変化例について、遮断範囲を局限化できることを示した。その本質は、基準となる設備エージェントの直近の与えられたタイプの設備を設備エージェントネットワーク内で全て探索する機能にあり、これは任意の系統構成について有効である。従って、遮断範囲の局限化は任意の系統構成に対して可能となる。

また、現行保護リレーでは予めあらゆる系統状態を想定して事前に整定を行うが、その作業は非常に煩雑である。これに対し、提案する保護システムではオンラインで認識する系統状態を用いてネットワーク探索などにより保護処理を行うため、煩雑な整定作業を行うことなく、常に系統状態に合致して遮断範囲を局限化できる。

<4.2>信頼性に関する考察

保護システム自体の障害時にも確実なバックアップ遮断が要求される。さらには必要最小限のバックアップ遮断が望ましい。

これに対して、現行の保護システムでは自端後備保護、自区間後備保護、遠端後備保護による対策を行ってきた。自端後備保護、自区間後備保護はそれぞれ、遮断器動作不良、主保護リレー動作不能をバックアップするものであり、予め対象としたケースについては最小限度の追加遮断とすることができる。しかし、多くのケースを対象にすれ

図6 系統構成変化時の主なエージェント群の作用
Fig.6. The operations of main agents for power system configuration change

ばかなりの設備投資が必要になる。また、遠端後備保護は時限協調により主保護リレー動作不良をバックアップするもので、複数の主保護リレーの後備保護を兼ねることもできるが、遮断範囲が広範囲になることや、遮断開始までに時限を要するという課題がある。

リレーエージェントのコンセプトはセンサや遮断器の機能を広域情報通信網を介して各装置で共有することを可能にし、同じ監視区間を対象とする複数の保護体エージェントを異なる装置に実装することで、ある装置の保守点検時や障害時にも他の装置に実装されている保護体エージェントが確実にバックアップ動作して保護システムとしての機能を遂行することを可能にする。このようにハードウェアの冗長度を抑えたまま高信頼性を確保することにより、設備投資コストの削減が期待できる。

<4.3> 情報収集能力に関する考察

差電流計算に必要な各地点の電流データなど、保護機能に必要なデータがシステムの各地点に分散していることもある。これらのデータの収集は、3章で述べた動作ロジックに基づいて、リレーエージェント間のリンクをたどって必要なら他の装置に移動しながら探索する機動エージェントが可能にしている。

一方、情報通信網の不良時には対策が必要となる。例えば、隣接する装置間の通信路が不良で自端の情報しか利用できない場合、距離リレーとしてのデータはあるが、差電流計算に必要なデータが揃わないというケースも有り得る。このように自端のみの情報しか利用できない場合は、自律的に距離リレーとして動作することが有効である。これは現行の距離リレーとの融合である。

<4.4> 動作時間に関する考察

保護システムは事故を高速に遮断する必要がある、処理速度への要求は大きい。特にその要求が大きい主保護では、図7のような実装パターンを想定した場合、以下のような処理が行われることになる。

- 事故発生
- アナログフィルタ出力
- A/D変換出力
- デジタルフィルタ出力
- 設備エージェント：CTデータ・PTデータ収集完了
- 送電線エージェント：必要なPTデータを収集
(一部は他ハードウェア内)
- 送電線エージェント：充電電流計算完了
- 監視体エージェント：充電電流データ、電流データを収集 (一部は他ハードウェア内)
- 監視体：差電流計算完了
- 遮断体：遮断起動
- 遮断体：CB遮断エージェント生成
- CB遮断エージェント：遮断対象CBエージェントと同じハードウェア内に移動
- CB遮断エージェント：CB遮断指令送出
- CBエージェント：CB遮断信号転送

つまり、現行の保護システムと異なり、異なる装置の情報や機能を利用するために、リレーエージェントを生成する時間やリレーエージェントが装置間を移動する時間などが必要となる。従って、CPUや伝送網の性能に応じて装置数を増減するといった分散度の調整が必要となる。近年の

マイクロプロセッサ技術や情報通信技術の急速な発展は、分散度の拡大を可能にすると考ええる。

また、同じハードウェア内エージェント間の通信よりも異なるハードウェア間の通信の方がより時間がかかるため、リレーエージェントの装置への実装パターンによって仕上がり時間が変わってくるのが予想される。実際、3章の動作シミュレーションから、リレーエージェント間の関係にも協調度の高いものと低いものがあることがわかる。例えば、監視体エージェントと監視区間の境界のCTエージェントは常時データをやり取りし協調度が高いが、異なる監視区間を対象とする監視体エージェント同士は互いにやり取りするデータも少なく協調度は低いと言える。処理速度の観点からは、協調度の高いものを同じハードウェアに、低いものを別々のハードウェアに実装することが望ましいことになる。

処理速度の観点からの最も極端な実装パターンとしては、全てのリレーエージェントを同じハードウェアに実装してしまうことが考えられるが、これだと信頼性確保のための多重化では全てをそっくり多重化する必要が生じ、5.2節で述べたようなコストメリットは失われる。従って、これら2つの目的を最適化するように実装パターンを決定することになる。これについては別途報告したい。

さらに、バックアップ保護時の動作時間については、現行の時限協調に代わり、CB不動作などバックアップ遮断の要因となる現象を直接に検出し起動条件とするため、高速な後備保護が可能になる。

5. まとめ

リレーエージェントによる協調動作型保護システムのコンセプトを提案した。このコンセプトに基づいて具体的なリレーエージェントを構成し、代表的な機能である主保護機能、CB誤不動作時バックアップ機能、CB開放時アダプティブ機能について、主なリレーエージェント群の協調動作ロジックをシミュレーションすることにより、複雑な系統状態変化に対しても必要最小限の遮断範囲が実現できることを示した。また、保護システム自体の高信頼性をハードウェアとして低い冗長度で実現できる可能性、動作時間

1つの装置内に実装する設備エージェントの範囲を示す

図7 実装パターン例
Fig.7. An example of installation pattern

について考察した。

今後は、処理速度、通信量、信頼性などを考慮したリレーエージェントのハードウェアへの実装パターンの最適化に関する検討、および定量的な評価を行う予定である。

(平成9年6月26日受付, 同9年9月22日再受付)

文 献

- (1) 富田泰志・福井千尋・工藤博之・香田潤・矢部邦明:「エージェントモデルによるアダプティブ保護リレーシステムの基礎検討」, 平9電気学会全大, No.1668
- (2) 香田潤・矢部邦明:「メッセージ交換モデルによる保護リレーシステムの基本コンセプト」, 平9電気学会全大, No.1667
- (3) S.H.Horowitz・A.G.Phadke・J.S.Thorp: "Adaptive Transmission System Relaying", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988, pp. 1436-1445
- (4) G.D.Rockefeller・C.L.Wagner・J.R.Linders・K.L.Hicks・D.T.Rizy: "ADAPTIVE TRANSMISSION RELAYING CONCEPTS FOR IMPROVED PERFORMANCE", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988, pp. 1446-1458
- (5) 電気協同研究会編:「第二世代デジタルリレー」, 電気協同研究第50巻1号(平6-4)

香田 潤 (正員) 1965年4月20日生。90年横浜国立大学大学院電子情報工学専攻修士課程修了。同年東京電力(株)入社。変電設備の保守・運転をへて、93年よりシステム研究所AI研究室にてリレー・統合資源計画等の研究に従事。

御学会会員。

矢部 邦明 (正員) 1956年4月7日生。80年東京大学工学部電気工学科卒業。同年東京電力(株)入社。86-87年MIT客員研究員。1992年よりシステム研究所AI研究室にて電力系統への知的システム技術の応用等に従事。IEEE会員。計測自動制

富田 泰志 (正員) 1965年12月7日生。90年九州大学大学院理学研究科数学専攻修士課程修了。同年4月(株)日立製作所日立研究所入社。主として電力系統の解析, 制御に関する研究に従事。数学会会員, 情報処理学会会員, IEEE会員。

福井 千尋 (正員) 1957年8月15日生。80年東京大学工学部電気工学科卒業。同年4月(株)日立製作所日立研究所入社。主として電力系統の解析, 制御およびAI応用に関する研究に従事。87~88年カーネギーメロン大学客員研究員。87年電気学会論文賞受賞。人工知能学会会員, IEEE会員, AAAI会員。

工藤 博之 (正員) 1947年10月12日生。74年九州工業大学工学研究科修士課程修了。同年(株)日立製作所入社。日立研究所にて主に系統保護制御, 配電自動化, 給電制御の研究開発に従事。81~82年米国 Rensselaer Polytechnic Institute 客員研究員。現在システム企画提案センター主管研究員。電気学会編修専門第2部会主査, 電力・エネルギー部門国際活動委員会委員, 論文委員。IEEE会員。工学博士。