

電力系統広域保護システム向け高精度時刻同期手法

High-Precision Time Synchronization Method for Wide-Area Power Line Protection Systems

伊藤 将志

河原田 明

藤川 冬樹

芹澤 善積

■ ITO Masashi

■ KAWARADA Akira

■ FUJIKAWA Fuyuki

■ SERIZAWA Yoshizumi

東芝と一般財団法人 電力中央研究所は、汎用通信技術の電力系統広域保護システムへの適用を目指して、共同研究に取り組んでいる。IP (Internet Protocol) を利用する汎用通信技術 (以下、IP系通信と呼ぶ) の適用は、柔軟なシステム構成や、信頼性の高い保護機能を実現できる。しかし、保護システムは電流・電圧計測の高精度な時刻同期を必要とするのに、通信遅延が変動するIP系通信では計測時刻を精度良く同期できないという問題がある。

そこでわれわれは、保護対象に応じて同期する範囲を分割し、遅延変動の影響を低減させる分散型時刻同期手法を提案した。広域通信網を想定したシミュレーションでこの手法を評価した結果、時刻同期精度が向上することを確認した。

Toshiba and the Central Research Institute of Electric Power Industry have been jointly promoting the research and development of Internet Protocol (IP) communication aimed at applying general-purpose communication technologies to wide-area power line protection systems. Although IP communication offers a flexible system configuration and highly reliable power line protection functions, it is not suitable for protection systems, which require the measurement of voltage and current data by each protection device with high-precision time synchronization, due to the fluctuation of its communication delay.

To rectify this situation, we have proposed a decentralized time synchronization method to achieve high-precision time synchronization even in IP communication networks by dividing the synchronization range according to the protection range. We have conducted simulation experiments applying this method to a wide-area communication network and confirmed that it can improve the accuracy of time synchronization.

1 まえがき

東芝と一般財団法人 電力中央研究所は、汎用通信技術の電力系統広域保護システムへの適用を目指し、共同研究に取り組んでいる⁽¹⁾。電力系統広域保護の分野では、システムの総所要コストの低減が必要である。IP系通信の適用により、装置の通信路共有による通信ケーブルの削減や、装置間の情報共有による情報管理の柔軟性向上などの効果をもたらすことが期待できる。

しかし、保護システムの電流・電圧計測に許容される同期の誤差は50 μ s ~ 百数十 μ s程度なのに対し、IP系通信は遅延変動が大きいと許容誤差を満たせない場合がある。

更に、IP系通信で使用する時刻同期システムは、唯一の基準時刻と通信網の全装置が時刻同期する全系型構成を想定していた。この構成では、通信網の末端に位置する装置と基準時刻を持つ装置との間の通信路が長くなる。通信路には、スイッチやルータなどの中継装置があり、複数の中継が同時に処理されると処理待ちが発生し、データの通信遅延に変動を与える。そのため、通信路が長いと、通信遅延変動が増大し、時刻同期の精度が低下する。

そこでわれわれは、互いに時刻同期を必要とする機能を持つ装置群ごとに基準時刻を用意することで、時刻同期用の通信を分散させ、通信路を短くする分散型時刻同期手法を提案

し、数台規模の実機で評価した⁽¹⁾。ここでは、提案手法の概要と、これを広域通信網に適用した場合の効果をシミュレーションにより評価した結果を述べる。

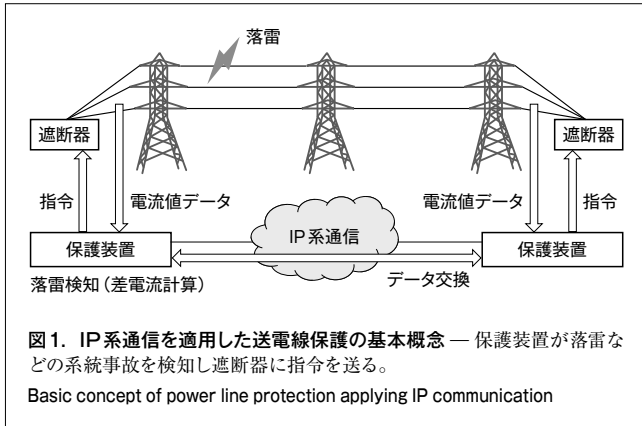
2 IP系通信を適用した広域保護システムの概要

IP系通信を適用した広域保護システムは、電力系統の電流値データの広域共有により、保護機能の配置自由度が増し、保護に関する機能の多様化や装置不良に対する柔軟性も向上する。ここでは、広域保護システムの一つである送電線保護システムについて述べる。また、保護機能の配置自由度の向上を実現し、IP系通信網に分散配置するモジュール型装置 (DMD : Decentralized Modular Device) について述べる。

2.1 IP系通信を利用した送電線保護システムの概要

送電線保護システムは、落雷などにより発生する送電線の短絡・地絡事故を検出し、事故区間を切り離す。図1はIP系通信を適用した送電線保護の基本概念である。保護装置は、電力系統から計測した電流値データをIP系通信網を経由して保護装置間で交換する。更に、交換した電流値データの差を求め (差電流計算)、事故を検出する。事故を検出すると、遮断指令を遮断器に送信し、遮断器が開いて事故を除去する。

事故点直近の遮断器で事故除去する保護機能を主保護、遮断器故障や主保護不動作に備えて事故点より遠方の遮断器



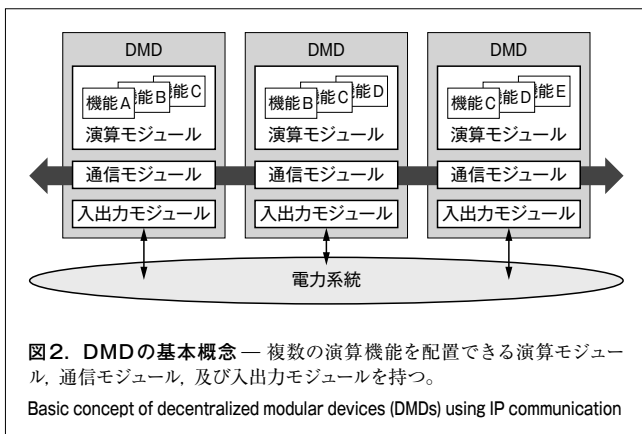
で事故除去する保護機能を後備保護と呼ぶ。主保護には事故検出精度に優れかつ高速な事故除去が可能な前述の差電流演算による事故検出方式が多く用いられる。

一方、従来の後備保護には保護装置がみづから計測した電流・電圧値だけを用いた事故検出方式が用いられ、保護機能の動作時間の協調や事故検出感度の調整が難しい面があった。IP系通信の適用によって電力系統広域の電流値データを装置間で共有できれば、保護範囲を拡大した後備保護にも事故検出精度に優れた差電流演算を利用できる。

2.2 DMD

柔軟な保護機能の配置を実現するDMDの基本概念を図2に示す。DMDは入出力、通信、及び演算のモジュールを持つ。入出力モジュールは、電力系統から電流・電圧値を取得する。通信モジュールは、取得した電流値データを他のDMDとの間で送受信する機能と、時刻同期機能を持つ。演算モジュールは、例えば送電線aの主保護、送電線aの後備保護、送電線bの主保護というように、保護対象に応じて演算機能を複数配置でき、それぞれ他のDMDから受信した電流値を比較して事故検出する。

このように、DMDを使用すれば、演算機能のモジュール化と広域な電流値データの共有により、任意の保護対象に対する演算機能を柔軟に配置できる。



3 IP系通信における時刻同期手法

IP系通信の適用は、通信ケーブルの削減や情報管理の柔軟性向上などの効果をもたらす。しかし、IP系通信の通信遅延変動は、同期のための時刻伝達を阻害する要因となる。時刻同期の課題と主な既存方式を以下に述べる。

3.1 時刻同期の基本課題

時刻同期の課題は、基準時刻を持つマスタから時刻合わせをするスレーブまでの通信遅延を高精度に推定することである。

時刻同期の基本シーケンスを図3に示す。スレーブは、マスタに対して基準時刻を要求し、マスタが応答した基準時刻に自分の時計を合わせる。このとき、マスタが基準時刻を生成してからスレーブが受信するまでの時間すなわち応答の通信遅延を、受信した基準時刻に加算してスレーブの基準時刻とする。

応答の推定通信遅延時間 t_d は、式(1)を用いて図3のタイムスタンプ $t_1 \sim t_4$ から計算される。

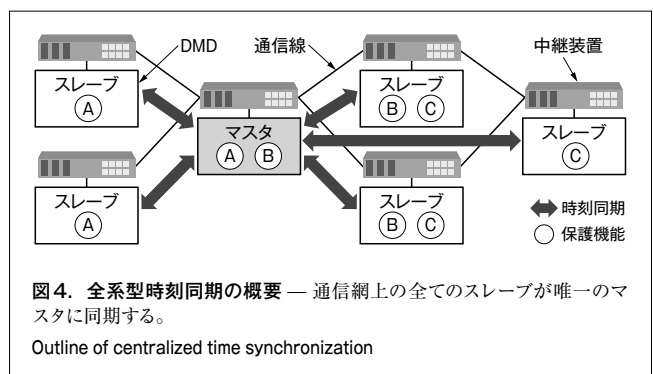
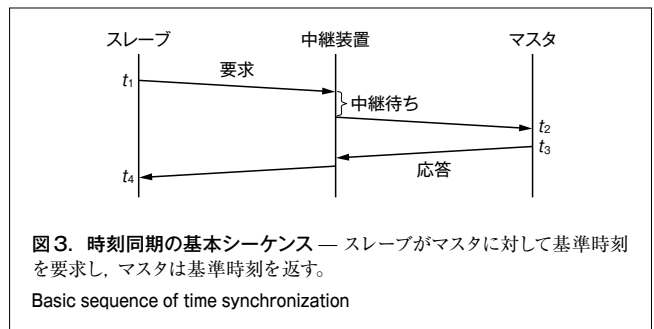
$$t_d = \{(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)\} / 2 \quad (1)$$

ここで、 t_1 はスレーブの要求送信時刻、 t_2 はマスタの要求受信時刻、 t_3 はマスタの応答送信時刻、 t_4 はスレーブの応答受信時刻を表す。

式(1)は要求と応答の通信遅延が等しいと仮定しているため、通信遅延の変動によって、要求と応答の通信遅延に差があると、 t_d と実際の応答の通信遅延との間に誤差が生じる。

3.2 全系型時刻同期の課題

全系型時刻同期の概要を図4に示す。端末はDMDを想定



し、複数の保護機能とともに時刻同期機能を持つ。全系型のシステムは、マスタとなる1台の端末が基準時刻を持ち、通信網の他の端末は全てスレーブとなりマスタの基準時刻と同期する。この構成はシンプルで管理が容易であるが、通信網の末端に位置するスレーブとマスタの通信路が長くなるため、通信遅延変動を増長する要因となる。

図4は、中継装置の数を6台とした例だが、実際の広域通信網では末端スレーブとマスタの間の通信路に多くの中継装置を含む。中継装置はデータ中継の待ち時間を発生させるため、多数の中継装置を経由すると通信遅延変動が大きくなる。

3.3 PTPによる高精度時刻同期手法の適用と課題

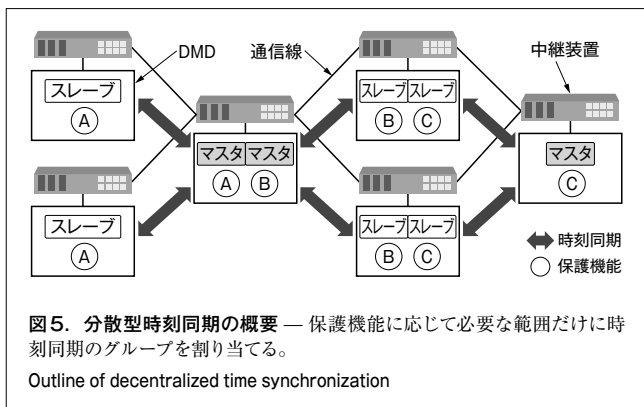
IP系通信の通信変動を考慮した時刻同期手法として、IEEE 1588 (電気電子技術者協会規格1588)-2008⁽²⁾に基づく高精度時刻同期手法 (PTP: Precision Time Protocol) がある。この手法は、TC (Transparent Clock) 方式と呼ばれる機能が中継装置内の滞留遅延を計測し、スレーブに通知することでスレーブは通信路上の中継時間の合計が把握できるため、正確に通信遅延を計算できる。

しかし、TC方式では、PTP専用の中継装置を用いる必要があり、コストの増加につながる。

4 分散型時刻同期の適用

提案する分散型時刻同期手法は、時刻同期の範囲を用途に応じて限定することで、通信遅延変動を軽減する。

分散型時刻同期の概要を図5に示す。分散型時刻同期は保護機能に応じてスレーブとマスタを配置するため、マスタとスレーブの間の通信経路の長さは保護機能の配置によって決まる。送電線の主保護機能は2章で述べたように送電線を挟んで配置される。後備保護機能も送電線を挟んで数段遠方の保護装置に配置される。つまり、通信網が広域化しても、時刻を同期する必要があるのは個別の保護機能の範囲に限定される。そのため、分散型時刻同期を広域保護システムに適用すると、時刻同期用通信の遅延変動を抑えられる。



5 シミュレーション評価

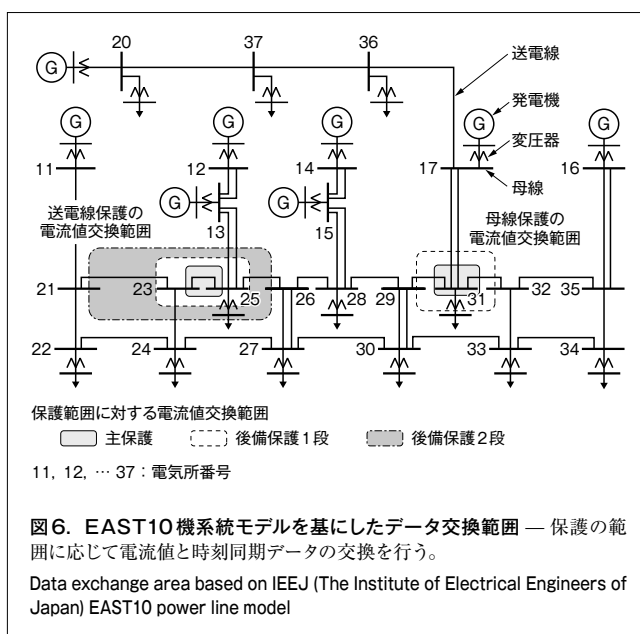
分散型と全系型の時刻同期精度を比較するため計算機シミュレーションを実施した⁽³⁾。計算機シミュレータには分散型と全系型の時刻同期、及び広域保護システムの通信に関わる機能を実装した。以下に、シミュレーションの条件を示し、シミュレーション結果とその考察について述べる。

5.1 シミュレーションの条件設定

広域な電力システムとして一般社団法人 電気学会の標準モデルシステム (EAST10機系統モデル)⁽⁴⁾を使用する。保護機能の配置は、EAST10機系統モデルの電気所 (保護装置や遮断器を設置する拠点) や各種回線構成を基にする。保護機能は送電線の主保護と後備保護、及び母線の主保護と後備保護の導入を想定する。母線とは、電気所に設置される回線であり、送電線や、遮断器、変圧器などを連絡するものである。

EAST10機系統モデルを基に保護機能の範囲、すなわち時刻同期と電流値データの交換範囲を図6に示す。図6では、送電線と母線の各1か所について電流値データの交換範囲を示している。送電線あるいは母線を挟む直近の遮断器に指令するDMDは、主保護のため電流値データを交換する。また、後備保護は、送電線保護が事故地点から2段遠方、母線保護が1段遠方の遮断器までの指令を想定するため、送電線あるいは母線の両端を挟み直近の遮断器に対し1段、2段遠方の遮断器に指令するDMDが電流値データを交換する。

シミュレーションでは、全ての送電線と母線に図6と同様の方針で電流値データ交換範囲を設定した。また、中継装置は電気所ごとに1台を持ち電気所内のDMD及び近隣電気所の中継装置と接続するものとし、通信速度は全て1Gビット/sとした。



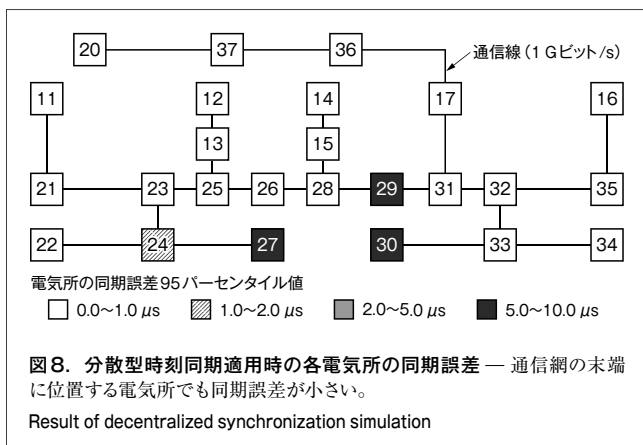
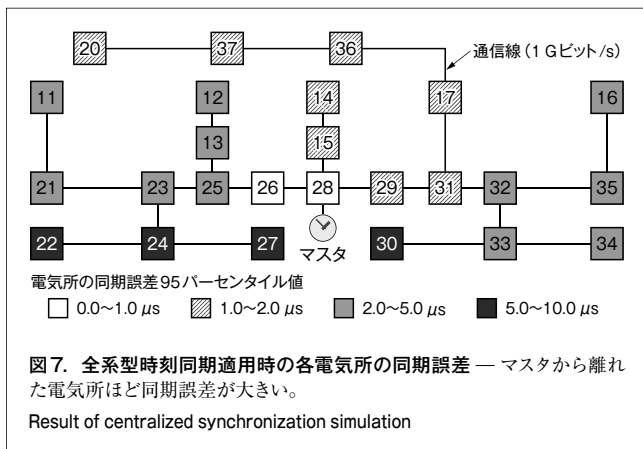
この評価で採用する全系統型と分散型の時刻同期方式は、一致させるよりも現実的に使用される可能性が高い方式を選んだ。全系統型はPTP（ただし、TCは評価対象外）、分散型は、保護装置の従来製品に実装されるリレー同期方式とした。ここで、二つの時刻同期方式の違いは通信シーケンスや、同期周期である。通信シーケンスは、PTPはマルチキャストによる全配信方式で、リレー同期はスレーブを順に同期するポーリング方式である。同期周期は、PTPが125 msで、リレー同期が100 msである。また、両方式とも遅延推定に統計処理によるフィルタは使用しない。

5.2 シミュレーション結果と考察

シミュレーションの結果、全系統型の全スレーブの同期誤差平均値は0.9 μs 、最大値は23.5 μs 、分散型の平均値は0.5 μs 、最大値は22.5 μs であった。平均値と最大値がともに小さい値であることから分散型の効果が確認できた。

全系統型適用時の各電気所の同期誤差を図7、分散型適用時の各電気所の同期誤差を図8に示す。図中の四角は図6の電気所を表し、凡例に従い電気所中の同期誤差の95パーセンタイル値、すなわち同期誤差の上位5%を除く最大値を表す。

分散型は全系統型に比べて、同期誤差が1.0 μs 以上の電気所の数が少ないことは明らかである。また、全系統型では、マ



タからの中継装置を経るごとに同期誤差が増加することがわかる。ただし、図7の上部の電気所よりも下部の電気所のほうが同期誤差の増大傾向が大きい。これは、下部は電気所が密集して通信データが多く、通信遅延変動を増大させるためと考えられる。同じ理由で分散型も、図8の下部の電気所の同期誤差が大きい。しかし、通信網の末端も同期誤差の増大が抑えられ、分散型の効果が現れている。

6 あとがき

IP系通信網を用いた広域保護システムの課題である時刻同期に対し、分散型時刻同期手法を提案した。シミュレーション結果から、分散型時刻同期は通信網の末端における同期誤差の増大を防ぎ、通信網全体の同期精度も高いことがわかった。

今回の結果では分散型、全系統型とも許容される同期誤差を満たしたが、全系統型は規模の条件が異なるとそれを満たせなくなることも想定される。今後は、更に大規模な通信網のシミュレーションや実機実験を通して分散型時刻同期手法の有用性を証明する。

文 献

- (1) 芹澤善積 他. 汎用・標準技術に基づく広域系統監視・保護制御システムのアーキテクチャと電力系統シミュレータでの検証. 電力中央研究所, 2013, R13012, 28p.
- (2) IEEE 1588: 2008. Precision Clock Synchronization Protocol for Network Measurement and Control Systems.
- (3) 電力系統モデル標準化調査専門員会編. 電力系統の標準モデル. 電気学会技術報告 第754号, 1999, 82p.
- (4) 伊藤将志 他. "IP系通信と時刻同期を用いた広域保護システムの通信シミュレーション評価". 電気学会 保護リレーシステム研究会. 東京, 2014-09, PPR-14-029.



伊藤 将志 ITO Masashi, D.Eng.

研究開発統括部 研究開発センター ネットワークシステムラボラトリー研究主務, 博士 (工学). 高精度時刻同期技術の研究・開発に従事。電子情報通信学会, 情報処理学会会員。
 Network System Lab.



河原田 明 KAWARADA Akira

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主務. 電力系統保護システムの通信ソフトウェア設計及び開発に従事。
 Fuchu Operations - Social Infrastructure Systems



藤川 冬樹 FUJIKAWA Fuyuki

一般財団法人 電力中央研究所 システム技術研究所 研究参事。制御系通信システムの研究に従事。電気学会会員。
 Central Research Institute of Electric Power Industry



芹澤 善積 SERIZAWA Yoshizumi, D.Eng.

一般財団法人 電力中央研究所 システム技術研究所 研究参事, 博士 (工学). 系統保護制御・通信システムに関する研究に従事。電気学会, 電子情報通信学会, IEEE 会員。
 Central Research Institute of Electric Power Industry