Ethernet による分散型保護リレーシステムの検討

正員 井上 和茂 (関西電力) 非会員 嶋野 真司 (関西電力)
 正員 伊藤 健司 (三菱電機) 正員 戸津 ユリ (三菱電機)
 非会員 中山 日出男 (メルコ・パワー・システムズ)

A Study on the Decentralized Protection Relay System using Ethernet

Kazushige Inoue, member, Sinji Simano, Non-member (Kansai Electric Power Co.)
 Kenji Itou, Yuri Tozu, member (Mitsubishi Electric Corp.)
 Hideo Nakayama, Non-member (Melco Power Systems Corp.)

In recent years, information technology has been developed and applied to various manufactural fields. In this paper, we present information technology application to the protection relay system in the electric power system.

We restructured the protection relay system as the decentralized network system by using Ethernet. we proposed the method of synchronization control and real time communication on Ethernet in order to achieve high accuracy of data sampling synchronization and high response speed. In performance test, it was confirmed that the proposed system could meet the requirement of the protection relay system.

キーワード：保護リレー、Ethernet、同期制御、リアルタイム通信、変電所、監視制御システム

1. まえがき

近年、IT(Information Technology)の技術革新は目覚ましく、計算機のCPU性能の向上、ネットワーク技術(分散処理技術)の進歩、通信の広帯域化により、最新の汎用情報技術が産業オートメーション分野に限らず、オンラインリアルタイムシステムにも適用されつつある。

汎用情報技術を活用して設備構築コストを削減する動きは、各産業分野において盛んである。電力の系統運用の分野でも、給電所、制御所、変電所などの監視・制御システムにおいて、従来は制御用計算機と専用の制御用ソフトウェアを用いてシステムを構築していたが、数年前から汎用ワークステーション、汎用OS(Unix)、汎用LAN(Ethernet)を用いたオープン分散システムとして構築するようになってきており、設備構築コストの削減を実現している。

また、海外では変電所自動化システムの通信に関する標準化の動きがあり、IEC TC57(Power system control and associated communication)がUCA2 (Utility Communications Architecture)をベースに、下位層に高速で高帯域なEthernet技術の適用を検討している。⁽⁵⁾⁽⁶⁾

電力系統の保護リレーシステムについては、トークンバス方式光LANを活用した屋外分散型保護制御システム⁽¹⁾やATM伝送によるキャリアリレーシステム⁽²⁾などの動き

が見られ、また海外においても保護機能をベイレベルに配置し、ネットワークでつないだシステムが導入されている。しかし、保護リレーシステムの主流は依然、専用ハードウェア、専用ソフトウェアを用いたシステムである。保護リレーシステムは、監視・制御システムと比べてより厳しい応答速度が要求されるが、既存の汎用情報技術では、ハードリアルタイム処理までは難しいことや、高い信頼性を要求されることなどが、保護リレーシステムを従来のシステム形態に留めている一つの要因であると思われる。

本論文は、設備構築コスト削減を目標として、保護リレーシステムを、汎用LANを中心に計算機が結合した分散型システムとして構築するための要素技術について提案を行う。汎用LANは、デファクトスタンダードとなっているEthernetを取り上げる。Ethernetに対応したソフトウェア、ハードウェアは多数存在するので、リレー演算部を除いたシステムの基本部分は、既存品の組合せで済むことから、独自開発が必要な部分を削減することができ、コスト削減を図ることができる。また、変電所内の監視・制御システムはEthernetを用いたオープン分散型システムが主流となっており、これとデータ処理、データ伝送関係を共通化し、重複する機能を削減することにより、変電所の監視、制御、保護システム全体として大幅に設備構築コストを削減することも可能となる。

保護リレーの要求性能を満足するために必要なサンプリング同期制御の方法、およびリアルタイム通信方法について提案する。また、実験システムを作り、実際の変電所相当の情報量で評価試験を行い、保護リレーシステムとして必要な性能を満足することが確認できたので報告する。

2. システムの基本構成

提案システムの基本コンセプトは図1の通りである。保護リレーシステムをデータ処理部、リレー演算部のように処理単位毎に分解する。計算機で最も効率よく処理できる量の処理単位を集め、あるいは変電所の機器配置上最も効率になる処理単位を集め、これを1台の端末で処理する。各端末は汎用 LAN でデータ結合される。端末には、汎用計算機（ワークステーション、またはパーソナルコンピュータ）などを使用し、安価なシステムを指向することも可能である。

図1の例では、保護リレーシステムをデータ処理を行う入出力端末とリレー演算を行うリレー端末に分けている。入出力端末は、現状のデジタルリレー（第一世代）と同じく、計器用変流器（CT）や計器用変圧器（PT）などから入力される電圧電流情報を $60\text{Hz} \times 12 = 720\text{Hz}$ （1.389ms 周期）でサンプリングし、A/D 変換をした後、機器（遮断器、断路器）の開閉情報を付け加えて、LAN へ出力することを想定する。リレー端末では、入出力端末から送られてくるデータをもとにリレー演算を行い、トリップ信号を LAN に出力する。トリップ信号は LAN を経由して入出力端末から当該遮断器へ出力される。

抵抗接地系の保護リレーを想定すると、システムの応答時間は系統事故発生からトリップ指令出力まで 50ms 以内が要求される。また、電流差動リレー等を考慮し、各入出力端末間のサンプリング同期を取ることも必要となる。

LAN は、Ethernet および UDP/IP プロトコルを採用する。Ethernet 採用の利点として、広い通信帯域と技術革新（10Mbps→100Mbps→1Gbps）、低価格、製品間の互換性があげられる反面、課題としてデータ衝突による応答時間の

不確定さがあげられる。以下で述べるが、定周期通信をソフトウェアで実現することにより、通信時間の正確さを確保することにした。また、Ethernet のネットワークポロジは、リング型は伝送遅延時間が大きくなることから、スター型、あるいはバス型を採用することとする。

3. サンプリング同期制御

<3.1>同期誤差の許容範囲

提案システムは、電流差動リレー等を考慮し、入出力端末間のサンプリング同期を取る必要がある。電流差動リレーの比率特性における誤差の許容範囲は、リレー誤差、CT 誤差、伝送系誤差で決まり、下記比率となる。

$$4\% (\text{リレー誤差}) + 2\% (\text{CT 誤差}) + 4\% (\text{伝送系誤差}) = 10\%$$

同期誤差は伝送系誤差の 4% 以内に入る必要があるので、

$$T_d = \frac{T_0}{2\pi} \cdot \sin^{-1} 0.04 = 106 \mu\text{s}$$

但し、 T_d : 伝送系誤差の許容時間、 T_0 : 1 サンプリング周期の時間である。

従って、同期誤差の許容範囲は $106 \mu\text{s}$ 以内となる。同期誤差はリレーの演算誤差につながるため、極力小さい値にする必要がある。

<3.2>初期同期制御

親端末 1 台を決め、残りを子端末とし、親端末により同期を合わせる従属同期方式を用いる。図2に基づき、以下に詳細手順を示す。

まず、親端末が子端末 1 へデータ伝送を行うのに要する片道伝送遅延時間を計測する。計測の際には伝送遅延時間変動を考慮し、親端末は子端末 1 へのデータ送信を複数回行い、伝送遅延時間を計測する。計測した伝送遅延時間の平均値をとり、片道平均伝送遅延時間 b_1 を算出して、子端末 1 へ送信する。子端末 1 は親端末から送られてきた片道平均伝送遅延時間 b_1 を受信し、同期待ち状態となる。次に親端末は子端末 2 との間で片道平均伝送遅延時間 b_2 を計測し、子端末 2 へ送信する。親端末は子端末の台数分同様

図1 システムの基本コンセプト

Fig.1. The Concept of the Proposed System

の処理を繰り返す。

親端末が子端末台数分の時間計測を終了した後、親端末は基準時間 (d) の計測を開始すると共に、同期データを全子端末へブロードキャスト送信する。子端末は同期データ受信と同時に、基準時間 d から片道平均伝送遅延時間 bn を引いた時間 ($d-bn$) の計測を開始する。

親端末は基準時間の計測開始から経過時間が d 以上になると、タイマ LSI のカウンタを初期化する。子端末は同期データの受信からの経過時間が $d-bn$ 以上になると、タイマ LSI のカウンタを初期化する。各端末はタイマ LSI のカウンタを使用して割り込み LSI から起動をかける。このカウンタ初期化により<3.3>で示すオンライン同期制御の開始となる。

図2 初期同期制御

Fig.2. The Initial Synchronization Control

<3.3>オンライン同期制御

初期同期制御のみでは、親端末、子端末の計算機のマザーボードの違い等により時間の経過とともに同期誤差が蓄積されていき、同期誤差許容範囲の超過に至る場合がある。そこで、サンプリング周期毎にオンライン同期制御により、同期誤差の微調整を行うことにする。

各端末はタイマ LSI と割り込み LSI を使用しハードウェアの割り込みにより起動する。同期誤差の微調整はこれらの LSI をソフトウェアから設定することにより行う。図3は上から下へソフトウェアの処理の順番を示し、図中「同期合せ」で本微調整を行う。この調整により、次回の起動タイミングである図中「起動」の位置を上下方向に変更させることになる。親端末の「送信処理」と子端末の「受信処理」は対応するものであり送信未の場合は受信待ちとなる前提である。以下に詳細手順を示す。

まず、親端末はサンプリング周期毎の定周期起動からデータ送信までの時間 a を子端末にブロードキャスト送信する。子端末は起動から親端末より送られてきたデータの受

信完了までの時間 Xn を計測しておく。このとき、初期同期制御で測定した片道平均伝送遅延時間 bn も考慮に入れることにする。

親端末と子端末の同期がとれている場合は、親端末のデータ送信処理に続いて、子端末の受信処理が連続して行われるため、親端末が送信を開始してから子端末が受信を完了するまでにかかる時間は、片道平均伝送遅延時間 bn に等しくなる。従って、関係式： $Xn \approx a + bn$ が成り立つ。

親端末の起動よりも子端末の起動が遅れている場合は、親端末のデータ送信処理が完了し、ハードウェア的には子端末にデータが到着しているため、子端末での受信処理は届いているデータを抜き出すだけであり、送受信に要する時間は bn よりも短くなる。従って、関係式： $Xn < a + bn$ が成り立つ。このとき、データ到着済みであることは認識できるが、到着時間は認識できないため、子端末が親端末よりどれだけ遅れているかは分からない。

親端末の起動よりも子端末の起動が進んでいる場合は、親端末のデータ送信開始までの待ち時間が発生するため、送受信に要する時間は bn よりも待ち時間分だけ長くなる。従って、関係式： $Xn > a + bn$ が成り立つ。このとき、子端末は親端末よりも、 $Xn - (a + bn)$ だけ起動が進んでいる。

図3 オンライン同期制御

Fig.3. The On-line Synchronization Control

以上より、オンライン同期制御では、 a, bn, Xn の関係式を次の3パターンに分けて行う。

- ・ $Xn \approx a + bn$ のとき、同期あわせは実施しない。
- ・ $Xn < a + bn$ のとき、子端末の起動が遅れていると判断し、次回の起動を少し進めるよう制御する。
- ・ $Xn > a + bn$ のとき、子端末の起動が進んでいると判断し、次回の起動を $Xn - (a + bn)$ だけ遅らすよう制御する。

4. Ethernet の伝送制御

<4.1> CSMA/CD 方式の問題点

Ethernet のデータアクセス方式は CSMA/CD (Carrier

Sense Multiple Access with Collision Detection) 方式で、データ衝突が発生した場合、ランダム時間送信を待機するので通信時間が不確定になるという欠点を有する。

例えば、Ethernet に 2 台の端末を接続し、データを伝送すると仮定する。(端末間のケーブル長は 256bit 時間長と仮定する。) 端末間の同期が完全に取れていると、第 1 回目の送信ではデータ衝突が発生する。衝突検出後は JAM 信号を 32bits 時間送信した後、back-off アルゴリズム⁽⁴⁾による時間だけ待機した後、再送信を行う。

1 回目衝突後の待機時間 t は下記となる。

$$512 \text{ ビット時間} \times 0 < t < 512 \text{ ビット時間} \times 2^1$$

1 回目に衝突し、2 回目の送信でも衝突する確率は下記になる⁽⁴⁾。

$$\frac{256 \text{ bit}}{512 \text{ bit} \times 2^1} = \frac{1}{2^2} = 0.25$$

引き続き、3 回目も衝突する確率は下記になる⁽⁴⁾。

$$\frac{1}{2^2} \times \frac{256 \text{ bit}}{512 \text{ bit} \times 2^2} = \frac{1}{2^5} = 0.03125$$

上記のように、Ethernet の CSMA/CD 方式は衝突後の応答が不確定(ランダム時間待機)で保護リレーシステムとして要求される応答時間内に納めることが難しい場合がある。リアルタイム性を重視する保護リレーシステムに Ethernet を適用するには、定周期通信を実現するための対策が必要である。なお、上記の計算および CSMA/CD 方式の詳細は付録 1 で説明する。

<4.2>送信権方式

提案システムのデータの特徴を考えると、入出力端末からの情報(電流、電圧、機器)は定容量、定周期(1 サンプル周期)で発生するのに対し、リレー端末からの情報(トリップ信号)は極小容量、ランダム周期で発生する。情報の大部分を占める定周期、定容量の電流、電圧、機器情報を効率よく伝送するために、各端末で順番にデータ送信を行うことで、衝突を避け定周期に通信を行うができる。リレー端末からのトリップ情報も、定周期でデータ送信を行う電流、電圧、機器情報に付加して伝送することとする。

定周期通信を実現するには、次の 2 つの方法がある。

(1) 送信権方式

各端末の送信順を決めておき、送信順の若い端末からデータ送信を行う。各端末は、自分の順番以外は受信し続ける。

(2) スケジューリング方式

データ衝突が発生しないように、各端末のデータ送信、受信タイミングを事前にスケジューリングしておく。各端末は、内部クロックを用い、スケジュールに従いデータの送受信を行う。

提案システムでは、制御の容易さ等を考慮し、送信権方式を採用することとし、送信権方式の制御を、各端末のアプ

リケーション部にて行うこととした。図 4 で送信権方式の概念を説明するとともに、処理手順の詳細を以下に示す。

あらかじめ全端末の送信順を決めておく。送信順の若い端末から全端末へブロードキャスト送信で情報伝送を行う。送信順でない端末はデータを受信し続ける。自端末より 1 つ若番の端末のデータの受信を完了したことにより、自端末のデータ送信を行う。順次送信を行い、接続端末数の受信完了で通信終了とする。受信待ち時はタイムアウト時間を設定し、タイムアウト発生時は通信不良とする。

図 4 送信権方式

Fig.4. The Cyclic Token Control

5. 評価試験

提案手法の性能検証のため、パーソナルコンピュータおよび Ethernet で実験システムを構成し、実際の変電所相当の情報量を用いて、変電所に必要な全ての保護機能を実現する評価試験を行った。

<5.1>モデル変電所

評価試験に用いたモデル変電所を図 5 に示す。本モデルは低位系実システムの最大規模を考慮したものである。

図 5 モデル変電所

Fig.5. The Model Substation

表 1 はモデル変電所に現状の保護システムを適用した場合

合について示したものである。電流、電圧のアナログ情報量は合計 293 量となる。

表 1 現状の保護システム
Table.1 The Present Protection System

回線名称	適用リレー	台数	情報量
77kV 送電線	回線選択保護	1 台	8 量
77kV 母線	単母線保護	1 台	27 量
77/22kV Δ / Δ ヲ	変圧器保護	2 台	12 量
77/6.6kV Δ / Δ ヲ	変圧器保護	3 台	18 量
22kV Δ / Δ ヲ	配電線保護	2 台	108 量
6.6kV Δ / Δ ヲ	配電線保護	3 台	120 量
		計	293 量

提案システムにおいて、系統側のアナログ情報および機器 (CB・LS) 情報は、送電線保護用、母線保護用等の様に目的別に分けるのではなく、平均的に入出力端末に配分して取り込まれる。取り込んだデータは測定箇所情報を付加し、Ethernet 上で 1.389ms 周期でリレー端末へ送信される。

測定箇所情報として、電流情報は、近傍の遮断器番号を利用して「CT 用途+遮断器番号」の組合せで表現できる (CT 用途とは「送電線用 CT」というものである)。電圧情報は、「PT 用途+電圧階級」で表現できる。機器情報は、当該遮断器番号で表現できる。何れの箇所情報も 2bytes で表現可能である。

各相個別のデータに箇所情報を 2bytes ずつ付加することも考えられるが、伝送効率を上げること、簡単に情報が切り出せることに配慮し、3 相一括等のセットを基本としてデータを纏める。アナログ情報は 1 相当たり 2bytes、機器情報は 3 相まとめて 2bytes で表現可能なことから、図 6 示すように入力情報を纏めることができる。

図 6 入力情報の最小単位 (例)

Fig.6. The Format Model of Input Data

モデル変電所における情報量を見積もったところ、アナログ情報は 762bytes 長 (情報量は 293 量)、機器情報は 272bytes 長 (情報量は 204 量) となった (付録 2)。

<5.2>実験システムの構成

パーソナルコンピュータ 3 台 (Pentium II 400MHz 機) を、Fast Ethernet (伝送速度 100Mbps) でスター結合して、図 7 に示す実験システムを構築した。

提案システムは入出力端末とリレー端末とに機能分担を行っているが、実験システムではシステムの最小化を図るため、パーソナルコンピュータに入出力端末とリレー端

末の両機能を搭載し、Ethernet を介したデータの送受信及びリレー演算を行うことにした。

図 7 実験システムの構成

Fig.7. Test System

入力データとしては、モデル変電所におけるアナログ情報 762bytes 長のみを扱い、端末 3 台分で割り、1 端末当たり 256bytes 長のデータを送受信することと仮定した。

リレー演算としては、適用リレーにおける処理時間をあらかじめ測定したところ、モデル変電所におけるリレー演算の総処理時間が約 2250 μ s であったことから、端末 3 台分で割り、1 端末当たり 750 μ s の処理時間を要すると仮定した。この仮定は、例えば端末 1 が、回線選択保護、単母線保護、変圧器保護のリレー演算を行い、端末 2 と端末 3 で配電線保護を行う演算量に相当する。

なお、Ethernet のネットワークインターフェースカード (NIC) は、特に高速化したものは使わず、市販の低価格の物を使用した。また、OS は 1 サンプル周期 (1.389ms) 毎の割込が可能で、周期割込精度が $\pm 3 \mu$ s であることが確認できた MS-DOS を用いた。サンプリング周期 (1.389ms) 毎の割込は、タイマ LSI のインターバルタイマを使用し、標準では 54.925ms 周期に設定されているところを、1.389ms 周期に変更することで実現した。

<5.3>評価試験の結果

実験システムの各処理時間は図 8 の通りとなった。

図 8 評価試験の結果

Fig.8. Result of the Performance Test

各端末の全てのデータが衝突無く円滑に伝送されることを確認するとともに、同期、データ送受信、リレー演算の全ての処理が1 サンプル周期以内 (1.389ms 以内) に終了することを確認した。また、端末間の同期誤差は 10 μ s 程度となり、同期誤差の許容範囲 (106 μ s 以内) を十分満足することを確認した。

ここで、データ送受信に要する 300 μ s は、図 9 に示すように送受信処理のオーバーヘッド(X1,X2)と実通信時間(Y)とに区別できる。送受信処理のオーバーヘッドは、伝送量に依存せず CPU 性能に依存する時間であり、実験に使用した Pentium II 400MHz 機では、X1=X2=40 μ s であったが、仮に CPU 性能が 2 倍になったとすると 1/2 の処理時間となり、X1=X2=20 μ s に短縮される。一方、実通信時間は、伝送路の速さに依存する時間であり、実験に使用した Fast Ethernet では、Y=20 μ s であったが、仮に Gbit Ethernet を使用したとすると、同じ伝送量のものが 1/8 時間で伝送でき、Y=2.5 μ s に短縮される。今後も、技術革新により、送受信にかかる時間は短縮されるため、接続端末数を増やしたり、他の処理時間を多くしたりすることが可能である。また、現状のデジタル保護リレーは 2 サンプル周期毎にデータ伝送とリレー演算を行うことも多く、実験システムも 2 サンプル周期毎のデータ伝送とリレー演算に変更すると更に処理能力に余裕が出てくる。

図 9 送受信の時間

Fig.9. Communication Time

6. システム構成のバリエーション

提案システムの入出力端末および Ethernet は、変電所の監視制御システムのデータベースとしても、その要求性能を満足させることが出来る。保護リレーシステムと監視制御システムにおいて、入出力端末および Ethernet を共用した場合、システムの制御周期の違いにより LAN を階層化し、データ更新周期が高速な保護用 LAN と、更新周期が低速な監視制御用 LAN とに分離した図 10 のシステム構成を取ることができる。監視制御システムは、ゲートウェイを介して保護用 LAN から電流、電圧、機器情報を受け取り、自システムに必要なデータに変換するとともに、遮断器、断路器等への制御信号を保護用 LAN を通じて入出力端末に渡し、実器の制御を行う。このとき、保護用 LAN の送信権制御では、ゲートウェイ端末 1 台分の送受信処理時間が増えることになるが、<5.3>評価試験の結果での送受信処理時間に関する考察より、CPU 性能が向上すると処理時間が短くなることから監視制御用 LAN との連係による制約は厳しくない。

図 10 システム構成例

Fig.10. A example of the complex system

提案システムは、全情報が LAN に集まることから、LAN に故障が起きると全ての機能が停止する。要求される信頼度レベルに応じて、LAN の多系列化が必要である。

現状のデジタルリレーは、誤動作対策としてメインリレーとフェイルセーフリレーを入力変換器から分離しており、ハードウェア不良による誤動作が無いよう考慮している。この構成を本システムでも踏襲する場合は、システムを直列 2 重化構成とすることが考えられる。また、フェイルセーフリレーは LAN を介さない構成として、メインリレーからの出力との AND をとる方法も考えられる。

一方、LAN の不良、端末の不良が起きた場合には、動作することが出来ないため、誤不動作対策としてシステムを 2 系列化する必要がある。また、多系列化をはかり、例えば、3 系列中 2 系列が動作した場合に出力を出すような多数決制御を行う場合は、誤動作、誤不動作の両方の対策ができる。

保護機能に着目してシステムの信頼度構成を選択することもできる。主保護は LAN を介した広域情報で行い、後備保護は過電流リレーや距離リレーなどにより LAN を介しないローカルな情報でリレー演算を行うという機能分担をすることにより、LAN 故障による主保護機能喪失時も後備保護機能だけは確保できるシステムを構築することが可能である。

なお、LAN の伝送メディアとしては、耐サージ性を考慮し、電磁誘導の影響が少ない光ファイバーケーブルを適用することが必要である。

7. むすび

本論文では、Ethernet を活用した分散型システム構成による保護リレーシステムを提案した。また、高速動作を実現するための要素技術を提案し、評価試験で保護リレーシステムの要求応答速度を十分満足できることを検証した。

提案システムは、変電所内の任意の場所の電流、電圧情報を同期誤差 $10\mu s$ 程度で取得することができるので、任意の場所の間で電流差動演算を行うことができるとともに、監視制御システムや事故復旧システムのデータベースとしても活用することができる。また、提案システムは、安価な汎用情報機器を導入することのできる汎用的なシステム構成をとり、システムの要求信頼度に応じて汎用品を導入することにより、設備構築コストの低減を図ることができる。
(平成 11 年 8 月 12 日受付、平成 12 年 4 月 7 日再受付)

文 献

- (1) 鈴木、前田、佐野、狩野、寺尾：「屋外分散型変電所全デジタル保護制御システムの開発 (1)」、昭和 63 電気学会全大、No.1209
- (2) 芹澤、清水、藤川、明神：「キャリアリレーシステムへの ATM 伝送の適用について」、電気学会保護リレーシステム研究会、PSR-97-1、1997
- (3) 井上、嶋野、伊藤、戸津、中山：「PC と LAN を応用した保護リレーシステムの考察」、平成 11 電気学会全大、No.1599
- (4) 泉谷：「Ethernet」、ソフト・リサーチ・センター、1997
- (5) Janez Zakonjsek, "Integration of secondary functions in an intelligent air insulated substation", PSPES, 1999
- (6) Jean Marmonier, Vincent Villard, Luc Hossenlopp, Rajendra Kumar Garg, "Increasing availability of GIS installations by using digital control, protection and monitoring systems", IEEE, Singapore, 2000

付録 1.

1) CSMA/CD の方式

- (1) ノードは、送信する場合に、まず伝送路の状態を確認する。(Carrier Sense)
- (2) 伝送路が空いていれば、送信を開始する。伝送路が空いていることを確認してからインターフレームギャップの時間 (96 ビット時間) だけ空ける必要がある。
- (3) もし、伝送路が空いていなければ、空くまで待つ。
- (4) 送信している間は、伝送路で衝突が起こっていないかどうかつねに確認する。送信している信号と受信している信号が同じであれば衝突は起こっていないと判断する。
- (5) もし、衝突を検出したら、すぐに送信を止めて、JAM 信号を 32bits 時間送信する。JAM 信号は、衝突を他のノードに知らせるための信号である。
- (6) JAM 信号を送信し終わった後、適当な時間待ちをして、再度(1)からのシーケンスを繰り返す。もしも 16 回失敗した場合には送信エラーで終了する。待ち時間は、再度、他のノードと同時に送信しないように次のように決める。
待ち時間 = スロット時間 (最小サイズフレームを送信する時間 = $512 \text{ ビット時間} \times w$)
 $w : 0 < w < 2^k$ であるランダム値

k : 再試行回数と 10 のうち小さい方の値
待ち時間は、10 回までは違う範囲のランダム値になるが、10 回から 16 回までは最大値は固定になる。

付図 1 CSMA/CD の動作

app.Fig.1. Performance of CSMA/CD

2) 衝突検出

電気信号および光信号の速度は有限であり、あるインターフェイスが送信を開始してからその信号が伝送路全体に伝搬されるまでには時間がかかる。この時間を t とすると、送信開始から時間 t までのあいだには、Carrier Sense を行っても他のインターフェイスが「送信は行われていない」と判断して送信を開始し衝突する可能性がある。付図 2 にこの場合を示す。

付図 2 衝突の発生

app.Fig.2. Occurrence of Collision

端末が 2 台のときの衝突確率を求める。端末 A と端末 B 間のケーブル長は最大ケーブル長 256bits 時間長とし、2 端末の時刻同期が完全にとれていると仮定する。1 回目の送信で、端末 A、B が同時にデータ送信を行うと、ケーブルの中央で衝突が発生する。衝突検出後は JAM 信号を 32bits 時間送信した後、back-off アルゴリズムによる時間だけ待機し再送信を行う。1 回目衝突後の待機時間は下記となる。

$$512\text{bits 時間} \times 0 < t < 512\text{bits 時間} \times 2^1$$

ここで、端末Aが待機時間0で再送信を行った場合、再送信開始から片道送信の256bits時間までのあいだには、Carrier Senseを行っていても端末Bが「送信は行われていない」と判断して送信を開始し、再び衝突するケースがある。つまり、端末Aと端末Bの再送信待機時間の差が片道送信時間256bits以内であれば2回目も衝突してしまう。この2回目の衝突確率は、下記となる。

$$\frac{\text{片道送信時間}}{\text{端末A,Bの再送信待ちの最大時間差}} = \frac{256\text{bits}}{512\text{bits} \times 2^1} = 0.25$$

付図3 再送信

app.Fig.3. Retry of communication

付録2.

モデル変電所における情報量の見積り

付表2 モデル変電所における情報量

app.Table.2. Information of the model substation

	階級	入力情報	最小単位	情報数: バイト	総バイト
アナログ情報	77kV	送電線用 CT	3 相一括×1 回線	2	8
		母線用 CT	同上	7	8
		変圧器用 CT	同上	5	8
		送電線用 PT	3 相一括×1 回線	2	8
		母線用 PT	3 相一括	2	8
		変圧器用 PT	3 相一括	2	8
	22kV	変圧器用 CT	3 相一括×1 回線	2	8
		配電用 CT	5 相一括×1 回線	20	12
		配電用 PT	4 相一括×1 ファイダー	2	10
	6.6kV	変圧器用 CT	3 相一括×1 回線	3	8
		配電用 CT	同上	36	8
		配電用 PT	4 相一括×1 ファイダー	3	10
機器情報	77kV	送電線側 CB+LS	3 相一括×1 回線	2	4
		変圧器側 CB+LS	同上	5	4
	22kV	変圧器側 CB+LS	3 相一括×1 回線	2	4
		配電側 CB+LS	同上	20	4
	6.6kV	変圧器側 CB+LS	3 相一括×1 回線	3	4
		配電側 CB+LS	同上	36	4
総数	アナログ情報		—	85	—
	機器情報		—	68	—

井上 和茂

(正員) 1964 年 10 月 17 日生まれ。1989 年 3 月東京理科大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月、関西電力(株)入社。現在、(財)エネルギー総合工学研究所に出向中。

嶋野 真司

(非会員) 1958 年 9 月 16 日生まれ。1985 年 3 月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月、関西電力(株)入社。現在、(財)人間生活工学研究センターに出向中。

伊藤 健司

(正員) 1966 年 1 月 21 日生まれ。1990 年 3 月明治大学工学部博士前期課程修了。同年 4 月三菱電機(株)入社、現在に至る。主として、同社系統変電・交通システム事業所にて保護リレーシステム設計に従事。

戸津 ユリ

(正員) 1971 年 11 月 12 日生まれ。1994 年 3 月同志社大学電子工学科卒業。同年 4 月三菱電機(株)入社、現在に至る。主として、同社系統変電・交通システム事業所にて保護リレーシステム設計に従事。

中山 日出男

(非会員) 1967 年 1 月 30 日生まれ。1991 年 3 月秋田大学鉱山学部機械工学科中退。現在、メルコ・パワー・システムズ(株)勤務。保護・制御システムのソフトウェア開発に従事。