

次世代変電所における時刻同期技術

Time Synchronization Technology for Next-Generation Electric Power Substations

小塚 康之

■ KOZAKAI Yasuyuki

近年、Ethernet機器の高速化や低コスト化を背景に、変電所、工場、列車といった産業システムのネットワークをEthernetで置き換える取組みが活発である。これらのうち次世代の変電所では、高精度な時刻同期と高い信頼性を実現するために、高精度時刻同期の国際規格であるIEEE 1588（電気電子技術者協会規格 1588）の適用が検討されている。この規格は、時刻を配信する複数の時刻サーバを同時運用する場合の通信方法を規定している。しかし、同時に1台の時刻サーバしか時刻を配信しない規定のため、時刻サーバの切替え時に時刻精度が悪化する問題があった。

東芝は、2台の時刻サーバが同時に時刻を配信するよう仕向けるネットワーク構成と、二つの時刻同期機構を搭載して2台の時刻サーバに同期可能な装置を開発した。これにより、1台の時刻サーバに異常が発生したときにも100 nsの時刻精度を維持でき、IEEE 1588を変電所に導入しても、多量の計測装置が電流・電圧値を間断なく監視するシステムを実現できる。

With the increase in speed and reduction in cost of Ethernet devices in recent years, the replacement of networks for various industrial systems, such as electric power substations, factory automation systems, railways, and so on, by Ethernet systems has been accelerating. Highly precise time synchronization and high reliability are essential in such systems. Particularly in the case of next-generation substations, the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 1588 Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems, which defines a protocol enabling precise synchronization of clocks in several time servers, is under consideration as a solution to improve reliability. However, the degradation of time accuracy in the event of primary time server failure is a crucial issue, because the definition in the standard specifies that only one time server distributes time information.

To solve this issue, Toshiba has developed both a network architecture in which two time servers distribute time information and a client that has redundant feedback loops, thereby achieving a time accuracy of 100 nsec even if a primary time server fails.

1 まえがき

近年のIT（情報技術）の発展に伴い、Ethernet機器の性能向上と低コスト化が著しい。このような状況を背景として、近年、リアルタイム性、高信頼性、温度などに対する耐性が要求される変電所、工場、列車といった産業システムにもEthernetが活用されつつある。東芝は、IEC 61850（国際電気標準会議規格 61850）対応の変電所制御システム、工場向けの情報・制御ネットワーク TC-netTM、列車向けの高速度伝送技術 TEBus（Train Ethernet Bus）など、多くの分野でEthernetを活用したシステムを実用化し、国際規格の策定に取り組んでいる。これらのうち、将来Ethernet化されると目されている変電所のプロセスバスは、もっとも高いレベルの時刻同期精度と信頼性を要求するネットワークシステムである。変圧器の故障や地絡といった系統事故が起きた箇所を即時に遮断するため、常に複数の計測装置が1 μ sの精度でタイミングを合わせて電流・電圧値を計測し、これを保護リレーと呼ばれる機器へ送信する必要がある。

通信遅延が大きく変動するEthernetのネットワーク上で機器間の時刻を同期する方法として、国際標準規格IEEE Std.

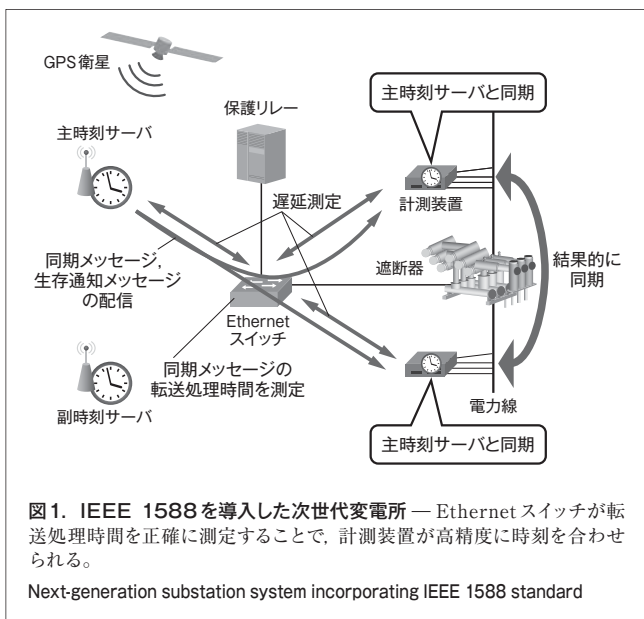
1588-2008⁽¹⁾（以下、IEEE 1588と記す）が策定されている。しかし、IEEE 1588をそのまま動作させると、時刻を配信する時刻サーバを2台設置していても、一方の時刻サーバが故障したとき、時刻の配信を受ける計測装置に数十 μ sの時刻誤差が生じる問題がある。

当社は、一方の時刻サーバが故障したときでも時刻精度を維持しながら時刻サーバを切り替える技術を開発した⁽²⁾。ここでは時刻サーバの切替え技術とその効果の評価結果などについて述べる。

2 IEEE 1588導入の課題

IEEE 1588の適用を想定した次世代変電所のプロセスバスを図1に示す。計測装置は電流と電圧を計測する機器である。

計測装置は、低価格だが、温度などの影響を受けやすい水晶発信器を搭載するため時刻がずれやすい。主時刻サーバはGPS（全地球測位システム）で高精度に時刻を把握し、定期的に時刻を記した同期メッセージを配信する。計測装置は同期メッセージからおおよその現時刻を把握できるが、同期メッセージに記された時刻は、同期メッセージがネットワーク上を

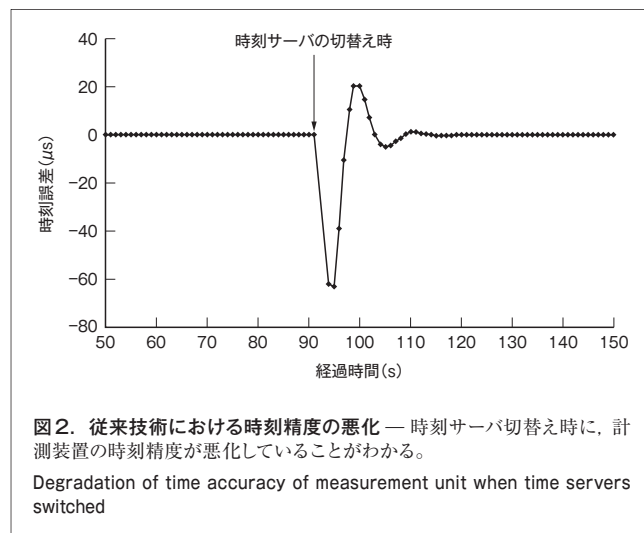


通過している時間分だけずれている。そこで、各機器はケーブルの伝送遅延を別途計測し、Ethernetスイッチは同期メッセージの転送処理に掛かる時間を計測する。計測装置はこれらの情報から、たとえばEthernetスイッチの転送処理時間が揺れても、現時刻を正確に把握できる。複数の計測装置は、結果的に互いの時刻が合うため、電流と電圧の計測タイミングを合わせられる。保護リレーは複数の計測装置から電流・電圧値を受信し、異常を検知すると即時に遮断指令を遮断器に送信する。

副時刻サーバは、主時刻サーバが通信不能になったとき、代理で時刻の配信を開始する。より具体的には、主時刻サーバが定期的に配信する生存通知のメッセージを副時刻サーバが受信できなかったとき、主時刻サーバの通信不能を検知する。このような時刻サーバの切替えに基づいた従来技術による冗長化方法には、次のような二つの問題があった。

- (1) 時刻精度の悪化 時刻サーバが切り替わるとき、計測装置の時刻精度が図2に示すように悪化する。図2は、主時刻サーバとEthernetスイッチをつなぐケーブルを抜いたときに生じる計測装置の時刻誤差を示しており、プロセスバスの要件である $1\mu\text{s}$ の時刻精度を満たせない過渡応答時間が数十秒間継続している。
- (2) 異常波及の可能性 時刻サーバどうしの通信に基づいているため、一方の不具合や異常が他方に波及する可能性がある。

(1)の原因は、現時刻の計算方法である。計測装置は過去の時刻情報を加味するフィードバック制御で計測装置の時刻の補正量を制御する。主時刻サーバに異常が起きたときはどのような異常が起きるか事前にわからないため、計測装置は過去の時刻情報を消去し、新たに補正量を調節しなおす。補



正量が落ち着くまでは過度に調節することになり、時刻精度が悪化する。

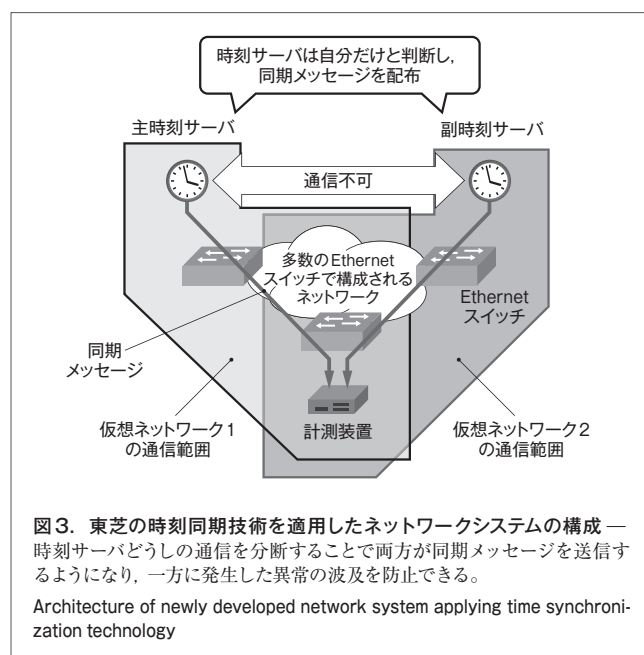
次章以降では、これらの問題を解決するために開発した技術について述べる。

3 開発技術による時刻サーバの二重化

当社は、時刻サーバが切り替わるときの時刻精度の改善と、時刻サーバの異常波及の防止を、ネットワーク構成と計測装置の時刻調整方法を工夫することで解決した。以下では、これら2点について述べる。

3.1 ネットワーク構成

当社の時刻同期技術を適用したネットワークシステムを図3



に示す。主時刻サーバと副時刻サーバの通信を分断する一方、時刻サーバと計測装置が通信できるようにネットワークを構成した。このようなネットワークでは、副時刻サーバがIEEE 1588の規格に従って自分しかネットワーク上に時刻サーバが存在しないと判断し、同期メッセージを配信するようになる。これにより、計測装置は常に主時刻サーバと副時刻サーバの両方から時刻情報を受信できる。計測装置は、一方の時刻サーバに異常が起きても、もう一方の時刻サーバから受信した時刻情報で調節済みの時刻の補正量を利用できるため、図2のような時刻誤差を除去できる。

これらの特徴を持つネットワーク構成にするために、VLAN (Virtual LAN) と呼ばれて広く普及しているIEEE 802.1Qに適合したEthernetスイッチを活用して、仮想的なネットワークを二つ構成した。2台の時刻サーバが別々のネットワークに属す一方で、計測装置は両方のネットワークに属している。時刻サーバにつながれた2台のEthernetスイッチは、異なるID (識別番号) を記したVLANタグと呼ばれるデータをEthernetのフレームに付与する。IDが異なるため、これらのEthernetスイッチは互いから転送されたフレームを破棄する。一方、計測装置とつながれたEthernetスイッチは、VLANタグを除去せずそのまま転送するように設定される。これにより、計測装置は両方の時刻サーバからの同期メッセージを受信できるようになる。

この構成は、時刻サーバの異常波及を防止するのにも役立つ。それぞれの時刻サーバは互いの生存通知メッセージを受信することがない。そこで、一方にどのような種類の異常が起きても、他方への波及を防止できる。例えば、IEEE 1588の時刻サーバは生存通知のメッセージを受信すると、それに記された優先度と自身の優先度に基づいて同期メッセージの送出可否を決定する。かりにオペレーションミスなどで、高い優先度が記された生存通知のメッセージが一方のネットワークに挿入されても、影響範囲は一方の時刻サーバにとどまる。

その他にも、この技術は時刻サーバに特殊な機能を必要とせず、IEEE 1588の必須機能だけで実現できるという利点がある。また、物理的にネットワークを分割する方法に比べて、計測装置に取り付けるEthernetのコネクタを増やさずに済むという利点もある。一方、主時刻サーバと副時刻サーバの両方が同期メッセージを常時送信することで、ネットワーク中を流れるデータ量は従来技術に比べて2倍に増えてしまう。しかし、同期メッセージの送信頻度が1sの場合でもデータの増加量は数百kビット/sにとどまるため、影響は軽微であると考えられる。

3.2 フィードバック制御機構の冗長化

計測装置内の構成を図4に示す。計測装置内では、ソフトウェアで実装したフィードバック制御機構を常時二つ動作させるようにした。一方の制御機構が不安定になっても、既に安定

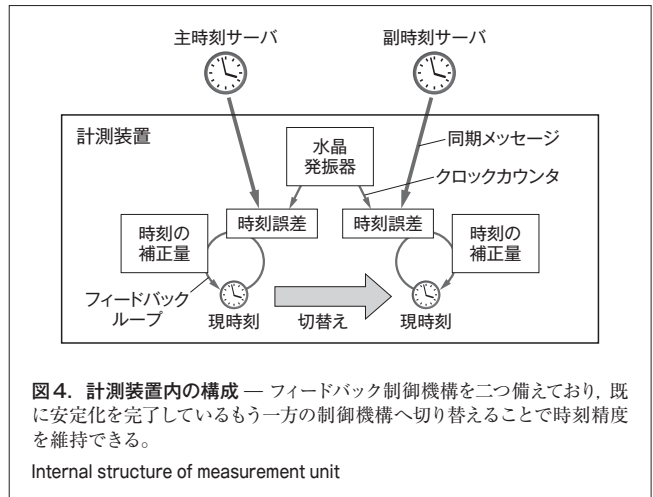


図4. 計測装置内の構成 — フィードバック制御機構を二つ備えており、既に安定化を完了しているもう一方の制御機構へ切り替えることで時刻精度を維持できる。

Internal structure of measurement unit

しているもう一方の制御機構へ切り替えられるため、時刻精度を維持できる。

具体的な計測装置の動作は、以下のとおりである。

二つの制御機構が別々の時刻サーバから受信した同期メッセージを利用して1s当たりに補正する時間を計算する。制御機構はそれを用いて現時刻を計算する。計測装置を起動し時刻同期を開始すると、数十sで時刻の補正量は安定する。両方の時刻サーバが正常のとき、計測装置は主時刻サーバと通信する制御機構が計算した時刻を利用する。一方、主時刻サーバに異常が起きたとき、計測装置は副時刻サーバと通信する制御機構が計算した時刻に切り替える。

この仕組みにより、計測装置が参照する時刻は常に安定する。

4 時刻精度の評価システム

当社が開発した計測装置における時刻サーバ切替え時の時刻精度を測定するため、図5に示す評価システムを開発した。

一般に、GPS受信機を搭載した時刻サーバどうしの時刻

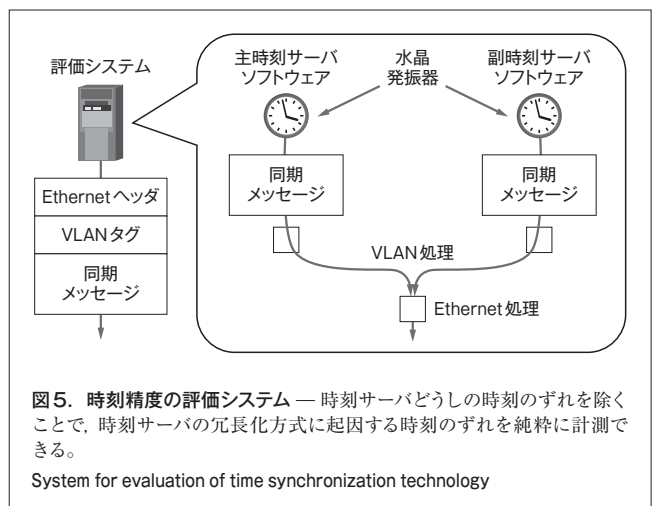


図5. 時刻精度の評価システム — 時刻サーバどうしの時刻のずれを除くことで、時刻サーバの冗長化方式に起因する時刻のずれを純粋に計測できる。

System for evaluation of time synchronization technology

は、ほぼ一定のずれを含むことがある³⁾。そこで、この評価システムが時刻サーバの冗長化方式に起因する時刻のずれを純粹に計測できるよう実装した。具体的には、時刻サーバをソフトウェアで実装し、それを同一のパソコン(PC)上で二つ動作させた。また、二つの時刻サーバが同じ水晶発振器を参照するよう設定した。これにより、それぞれの時刻は常に一致する。

5 開発技術の効果

当社が開発した技術を適用した場合と、従来どおりIEEE 1588をそのまま利用した場合の実験結果を図6に示す。この実験では、PCにIEEE 1588機能を実装して計測装置を模擬した。また、評価システム内で動作していた主時刻サーバの

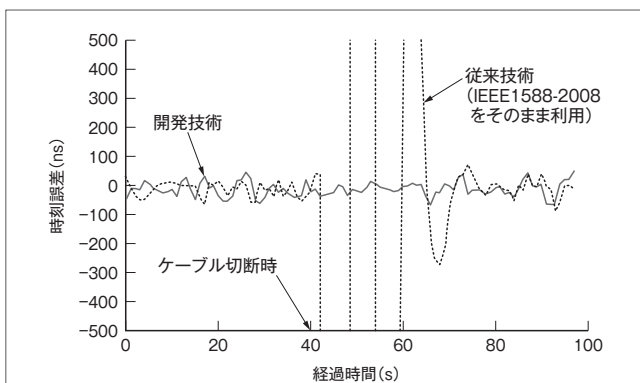


図6. 開発技術の効果 — ケーブルを切断したときでも ± 100 nsの高い時刻精度を維持していることが確認できる。
Results of evaluation of time synchronization technology

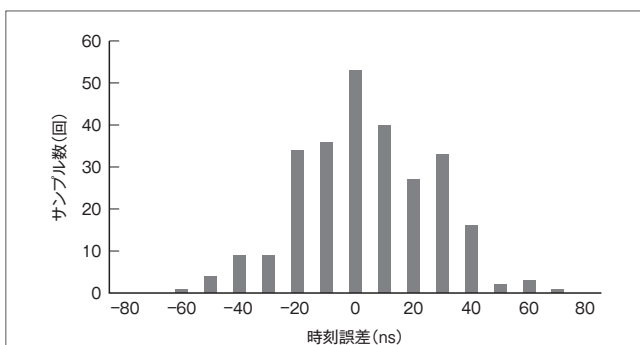


図7. 時刻サーバ切替直後の時刻誤差 — 多数回切り替えても時刻精度を維持できていることがわかる。
Time error immediately after switching of time servers

プログラムを故意に停止し、計測装置が副時刻サーバへ切り替わるときの時刻誤差を計測した。実装したIEEE 1588機能は、Ethernetチップが備えるEthernetフレーム送受信時のタイムスタンプ機能を活用することで、高精度に時刻を合わせられる。図6から、当社が開発した技術は計測装置が時刻サーバを切り替えるときでも、誤差が100 ns以下の高い時刻精度を維持できていることがわかる。

約270回計測した切替え直後の時刻誤差を図7に示す。この図から、多数回切り替えても、当社が開発した技術は時刻精度を維持できていることがわかる。

6 あとがき

ここでは、当社が開発した、時刻サーバの切替え時にも時刻精度を維持する時刻同期技術について述べた。

この技術により、Ethernetを導入した変電所制御システムにおいて、時刻サーバに異常が起きても、多量の計測装置が電流・電圧値を間断なく監視できるようになる。また、一方の時刻サーバから他方へ異常が波及することを防止できる。

この技術は変電所に限らず、信頼性とリアルタイム性が求められる工場のオートメーションなどへの応用も期待される。

文献

- (1) IEEE Std. 1588-2008. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems.
- (2) Kozakai, Y.; Kanda, M. "Keeping clock accuracy on a master clock failure in substation network". Proc. IEEE ISPCS 2010. Portsmouth, USA, 2010-09, IEEE. p.25 - 29.
- (3) 佐藤克久 他. "GPS時刻同期型NTPサーバーの時刻精度について". 東北大学技術研究会報告. 東北大学, 2001, p.192 - 194.



小塚 康之 KOZAKAI Yasuyuki

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。
ネットワークシステムの研究・開発に従事。情報処理学会会員。
Network System Lab.