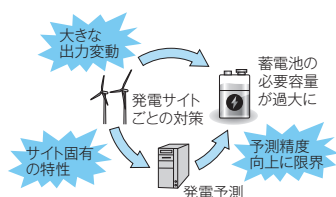


広域ネットワークの 高精度時刻同期技術

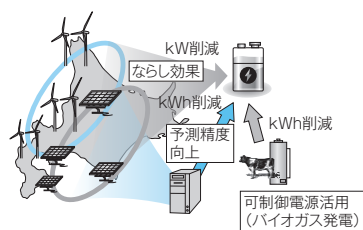
露木和生 Kazuo Tsuyuki
佐野慎一 Shin'ichi Sano
石井 隆 Takashi Ishii
中尾浩二 Koji Nakao

キーワード IEEE1588、高精度時刻同期プロトコル、時刻同期、スマートメータ

概要



従来型の出力変動対策技術



広域運用システムのイメージ

再生可能エネルギー（RE：Renewable Energy）電源の導入に伴い、風力や太陽光などの自然エネルギーを利用する間欠性電源が増加すると、急峻な発電出力変動が電力システムの安定性に影響を与えることが懸念される。RE電源の発電出力による影響を軽減するには、蓄電池による出力一定制御が有効であり、実用化にはコスト面の問題から蓄電池の容量削減が重要である。

このような問題を解決するために、当社は共同実施者として環境省の委託事業である「風力発電等分散型エネルギーの広域運用システムに関する実証研究」⁽¹⁾を2012年度から開始した。本事業では通信網を介して北海道内に分散配置されたRE電源を一括管理することで、RE電源の安定化対策に用いる蓄電池容量の大幅な削減を目的とした。

1 まえがき

再生可能エネルギー（RE：Renewable Energy）電源の導入に伴い、風力・太陽光などの自然エネルギーを利用する間欠性電源が増加すると、電力システムの需給バランスの維持が困難となり、システムの安定性を損なう恐れがあることが指摘されている。

このような問題の解決に向けて、日本気象協会・北海道大学・(株)北海電気工事・(株)北電総合設計・(株)明電舎は、RE電源の安定化対策に用いる蓄電池容量の削減を目的とした環境省の委託事業である「風力発電等分散型エネルギーの広域運用システムに関する実証研究」⁽¹⁾を2012年度から開始した。

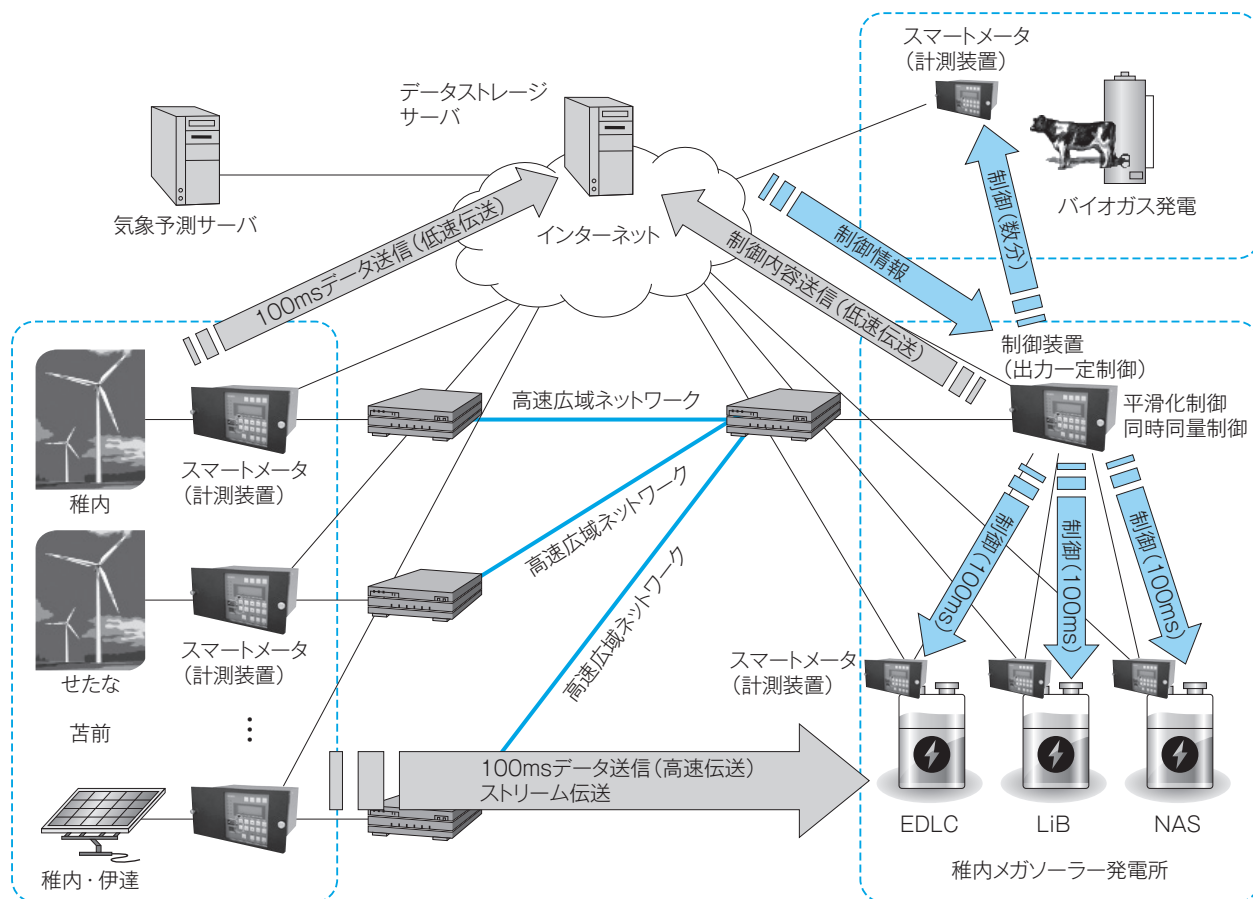
広域に分散配置されたRE電源を一括管理して蓄電池容量を削減するためには、各電源及び蓄電池の出力を高精度に時刻同期して収集する必要がある。

広域ネットワークで時刻同期を実現するため、

IEEE1588を適用したスマートメータを開発するとともに、光回線・ADSL・ISDNなどの伝送路を介して広域に分散配置したスマートメータの時刻同期精度を測定・評価した。また、インターネットを介した廉価な一般公衆回線におけるIEEE1588適用可否の評価も併せて実施した。本稿では、IEEE1588を適用した時刻同期技術を紹介する。

2 広域運用システムのシステム構成

第1図に広域運用システムのシステム構成を示す。本事業では、広域に分散配置されたRE電源の発電出力変動を確実に補償するとともに、電力システムにおける需給のアンバランス、すなわち蓄電池による安定化制御の結果が電力システムで適切に行われたか否かを、同一の時間断面で評価することが重要である。このため、高速な通信ネットワークを構築し、



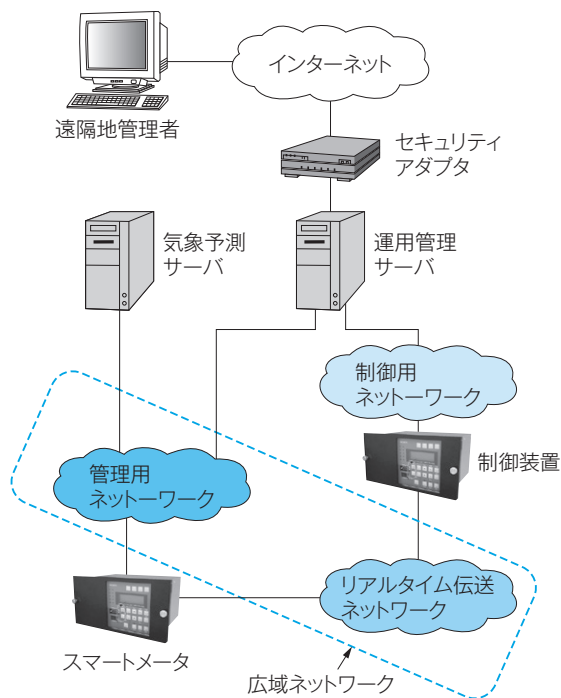
第 1 図 広域運用システムのシステム構成

広域に分散された発電サイトの発電量と蓄電池の放充電出力を、高精度に時刻同期して制御用スマートメータで収集し、蓄電池及びBGを適切に制御する。

分散配置された各発電サイトの発電量と蓄電池の充放電出力値を、高精度に時刻同期させることとした。

広域運用システムでは、リアルタイム制御のための高速データ伝送と事後に制御結果を評価するための大容量データ通信を同時に両立させる必要がある。そこで、通信ネットワークの帯域を「リアルタイム伝送ネットワーク」と「管理用ネットワーク」の二つに分割し、両者の通信が影響しない構成とした。第 2 図に広域ネットワークの論理構成イメージを示す。

北海道内で広域運用システムを実証するにあたり、風力発電サイトとして稚内・苫前・せたなの3か所を、太陽光発電サイトとして稚内・伊達の2か所を対象とした。また蓄電システムは、稚内にあるメガソーラー発電所内に構築した。稚内メガソーラー発電所は(独)新エネルギー・産業技術統合開発機構 (NEDO) の実証事業で構築された発電サ



第 2 図 広域ネットワークの論理構成イメージ

リアルタイム伝送ネットワークと管理用ネットワークの二つに分割した広域ネットワーク構成を示す。

イトであり、1.5MWのナトリウム硫黄電池（NAS）が既設設備として設置されている⁽²⁾。このうち500kWのNASを本事業の制御対象とした。また新規設備として、電気二重層キャパシタ（EDLC：Electric Double Layer Capacitor）とリチウムイオン電池（LiB：Lithium-ion Battery）を構築した。さらに酪農が盛んでバイオガスの入手が容易な土幌に、バイオガス発電機（BG：Biogas Generator）を設置した。第1表に発電サイトの諸元を、第2表に可制御電源の諸元を示す。

3 広域ネットワークの通信網

広域運用システムでは、適用する通信網の伝送品質が非常に重要である。通信網の性能を重視すれば専用線を用いることが理想的ではあるが、コスト面での問題があるため、本事業では公共通信網を用いて、帯域が保証された光回線による仮想的な専用回

第1表 発電サイトの諸元

発電サイトの諸元を示す。

発電サイト		発電機容量	
風力	稚内	660kW×3	1980kW
	苫前	600kW×2 1000kW×1	2200kW
	せたな	600kW×2	1200kW
	小計		5380kW
太陽光	稚内 ^{*1}	250kW×4	1000kW
	伊達 ^{*2}	250kVA×5	1000kW
	小計		2000kW
合計			7380kW

注. ※1. 稚内メガソーラー発電所の設備容量4990kWのうち、1000kW分のみが本事業の対象
 ※2. 伊達ソーラー発電所は無効電力制御ため、合計1250kVAの設備容量を持つが、発電容量は1000kW

第2表 可制御電源の諸元

可制御電源の諸元を示す。

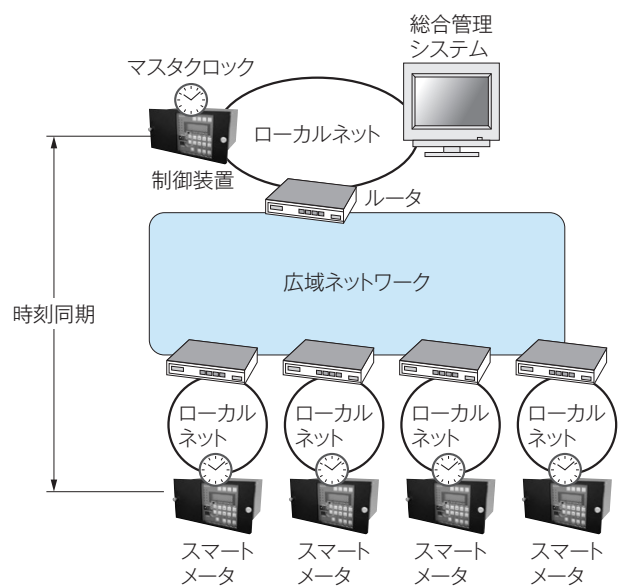
種別	設置箇所	定格容量	放電時間
NAS	稚内	500kW	7.2時間
LiB	稚内	100kW	2時間
EDLC	稚内	100kW	60秒
BG	土幌	25kW	—

線を構築した。自然エネルギーの発電サイトは、市街地から離れた箇所に適地が多いことから、光回線を確保することが難しい場合が多い。将来的な普及を考えると、公衆回線を用いた伝送として回線速度が劣るケースの評価も重要である。そこで、風力発電サイト（苫前）にはADSL回線、BG（土幌）にはISDN回線を採用して、それぞれの通信性能評価を実施した。

さらにインターネットを介した廉価な公衆回線でのIEEE1588適用可否を把握するため、日本最北端の稚内メガソーラー発電所からほぼ日本列島半分の距離に位置する当社沼津工場にスマートメータを設置し、インターネット回線（有線）とインターネット回線（無線）の通信性能評価を実施した。

4 時刻同期システムの構築

各スマートメータには、通信ネットワークを介して高精度な時刻同期が可能なIEEE1588時刻同期プロトコル（PTP：Precision Time Protocol）を適用した。PTPは、ネットワーク内の通信遅れを正確に計測して遅延時間を補正することで、高精度の時刻同期を可能とする。第3図に時刻同期の構成イメージを示す。



第3図 時刻同期構成イメージ

時刻同期構成のイメージを示す。

本事業では、広域運用システムで実現すべき計測・制御システムの制御応答時間、計測・制御情報の伝送遅延時間、計測データの時刻同期精度のそれぞれに目標性能を設定した。制御応答時間はRE電源の変動特性や電力システムの応答特性を考慮して、秒オーダーの応答性が実現できれば必要十分であることから、500ms以内を目標とした。この制御応答時間を実現するために制御周期を100msに設定し、伝送遅延時間は制御周期の1/2である50ms以内を目標とした。時刻同期精度は、制御周期の1/10となる10ms以内を目標とした⁽³⁾。

5 IEEE1588時刻同期対応スマートメータの開発

本事業では、各発電サイトの発電出力や蓄電システムの出力を計測するタイプ、BG出力を計測及び個別制御するタイプ、広域運用システムを全体制御するタイプ、計3種類のスマートメータを開発した。ハードウェアには、当社製ユニットタイプのデジタル形保護リレーMRR (Meiden Reliable Relay unit) シリーズを採用し、同装置の通信インタフェースとしてIEEE1588に対応した伝送基板を新たに開発した。第4図にスマートメータの外観を示す。

RE電源サイトと蓄電システムに設置される計測用スマートメータは、IEEE1588による時刻同期を行いながら、VT (Voltage Transformer) 及びCT (Current Transformer) の入力値から各種電流量



第4図 スマートメータ

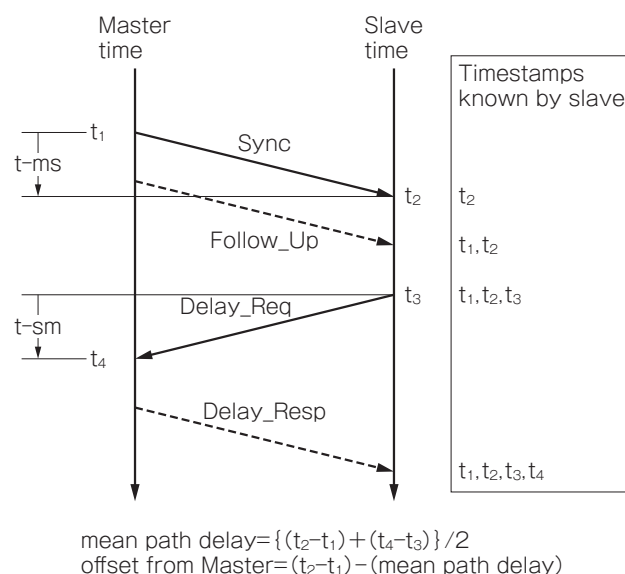
スマートメータには、当社製ユニットタイプのデジタル形保護リレーMRRシリーズを採用した。

を演算し、UDPプロトコルを用いて100msごとに演算結果を制御用スマートメータへ送信する。BG用スマートメータは計測用スマートメータの処理に加え、制御用スマートメータとBGの間で制御指令・状態の通信を仲介する。制御用スマートメータは前述の各スマートメータから計測値をリアルタイムに収集し、発電出力予測に基づいた出力目標値を維持するように蓄電システム及びBGの出力値を演算・制御指令する。

6 時刻同期技術

第5図にIEEE1588による時刻同期の仕組みを示す⁽⁴⁾。時刻を合わせたいスレーブ装置が、正確な時刻を持つマスタ装置から時刻情報を取得することになるが、これだけではネットワークの伝送遅延時間分ずれてしまう。そこで、送信時刻・受信時刻が記録された同期パケットをやり取りすることで、スレーブ装置は往復の伝送遅延時間を算出し、マスタ装置との時刻偏差を求め自身の時刻を補正する。

またIEEE1588が高精度とうたわれるゆえんとして、ハードウェアのサポートが挙げられる。同期パ



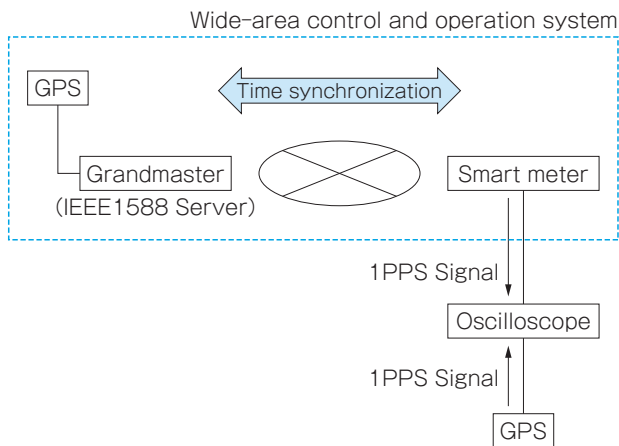
第5図 IEEE1588時刻同期の仕組み

PTPプロトコルの一例(伝送遅延時間と時刻偏差の算出手順)を示す。IEEE1588では具体的な補正方法は規定されていないが、基本的な考え方は、往復伝送遅延時間の平均(すなわち往路復路で伝送遅延時間が等しいという仮定)から時刻偏差を求めることになる。

ケットの送受信時刻をハードウェアが取得することで、ソフトウェアの処理時間が介在しないため、余計な誤差要因を除外できるメリットがある。

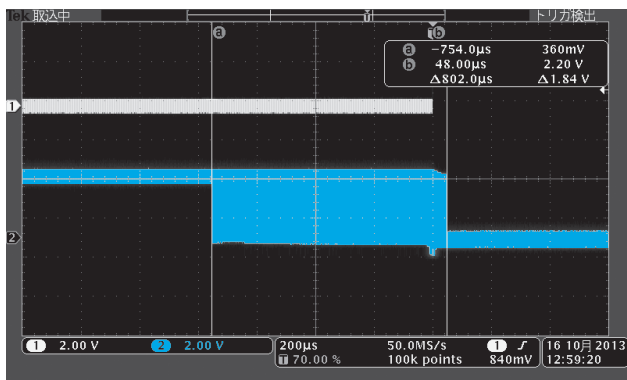
7 時刻同期検証試験

広域運用システムでは、計測値のリアルタイム性が最終的なRE電源の安定化性能に影響するため、時刻同期精度を向上させることは極めて重要となる。そこで各サイトにGPS (Global Positioning System) 装置を仮設し、スマートメータと1PPS信号の時間差を測定することで、時刻同期精度の検証を実施した。第6図に検証時の試験回路構成を示す。一例として、第7図に光回線によって接続され



第6図 時刻同期精度検証試験回路構成

GPSとスマートメータの1PPS信号時間差から時刻同期精度を評価した。



第7図 1PPS信号の測定結果 (光回線)

実際のスマートメータ1PPS信号例を示す。

た稚内風力発電所のスマートメータにおける1PPS信号の測定結果を示す。GPSに対してスマートメータの時刻が進み754 μ sから遅れ48 μ sの範囲で変動し、中心値は約400 μ s進んでいることが分かる。

8 測定結果

第3表に時刻同期精度の測定結果を示す。光回線及びADSL回線は時刻同期の目標性能 (10ms以内) を達成できたことを確認した。ISDN回線は目標性能をクリアしたものの、他回線と比較してばらつきが大きかった。

第4表にインターネット回線 (有線及び無線) の伝送遅延時間の測定結果を示す。どちらも目標値をクリアしておらず、有線では最大28ms (遅れ)、無線では最大51ms (進み) の遅延時間が発生した。IEEE1588はその仕組み上、ネットワークの伝送遅延時間のゆらぎや非対称性が直接同期精度に影響してしまう。このような回線にIEEE1588を適用する場合には、統計的アプローチによる伝送遅延時間の推定など、独自の工夫が必要と考えられる。

第3表 時刻同期精度の測定結果

時刻同期精度の測定結果を示す。

回線種別	接続先	遅延 (+遅/-進)	変動幅
光回線	稚内風力発電所	-400 μ s	\pm 400 μ s
ADSL	苫前風力発電所	+1.6ms	\pm 700 μ s
ISDN	士幌BG	-2ms	\pm 3ms

第4表 インターネット回線 (有線及び無線) の伝送遅延時間測定結果

インターネット回線 (有線・無線) における伝送遅延時間の測定結果を示す。測定用スマートメータは、当社沼津工場に設置した。

回線種別	接続先	遅延時間 (+遅/-進)
インターネット回線 (有線)	当社沼津工場	-1~+28ms
インターネット回線 (無線)	当社沼津工場	-51~30ms

9 むすび

本稿では、環境省の委託事業として実施中の「風力発電等分散型エネルギーの広域運用システムに関する実証検証」で構築した実証システムの通信網にIEEE1588を適用した時刻同期技術について紹介した。

今後もIEEE1588に関する知見を更に深めるとともに、様々なケースの性能評価を実施することで適用拡大を図り、RE電源の安定化や自然エネルギーの普及に寄与していく所存である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) 環境省HP：
http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=20645&hou_id=15677
- (2) 齋藤 裕・伊藤孝充・北 裕幸・原 亮一・滝谷克幸・平 幸治：
「稚内メガソーラープロジェクト（1）－効率的な設備構築に向けた運用実績の評価および分析－」，平成22年電気学会電力・エネルギー

ギー部門大会，137，2010

(3) 植田喜延・金山哲也・田邊隆之ほか：「IEEE1588を適用した広域運用システムにおける時刻同期精度の評価」，平成26年保護リレーシステム研究会PPR-14-18

(4) IEEE Std. 1588-2008. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems.

《執筆者紹介》



露木 和生
Kazuo Tsuyuki

製品技術研究所
保護・制御装置のソフトウェア開発に従事



佐野 慎一
Shin'ichi Sano

ICT製品・サービス統括本部企画部
ICT関連製品の営業企画に従事



石井 隆
Takashi Ishii

製品技術研究所
保護・制御装置のハードウェア開発に従事



中尾 浩二
Koji Nakao

ICT製品・サービス統括本部開発部
ICT関連製品のデータ解析・分析に従事