

太陽光発電の出力実績推定・予測システムの開発と実用化

(株)四国総合研究所 電力技術部 瀧川 喜義

キーワード： 太陽光発電
出力推定
出力予測
気象庁数値予報
衛星雲画像

Key Words : Photovoltaics
Output Estimation
Output Prediction
JMA-GPV
Satellite Cloud Image

Development and Practical Use of Estimation and Prediction System of PV.

Shikoku Research Institute, Inc., Electric Power Technologies
Kiyoshi Takigawa

Abstract

Photovoltaics (PV) are rapidly spreading, since they are clean renewable energy and don't emit CO₂. However, when PV systems are introduced in large quantities, there are concerns about the potential effects on the operation of electric power system, because their output are changed according to the weather and we can't control them. We need to effectively use their generated power in the planning and controlling of an electric power system.

We developed the estimation system of PV output in real time using measurements of solar radiation and cloud images of meteorological satellite. And we developed the prediction system using JMA-GPV and cloud images of meteorological satellite.

In this paper, we explain these estimation and prediction method and practical use system.

1. はじめに

太陽光発電(PV)は発電中に二酸化炭素を排出しないクリーンなエネルギーとして注目されており、固定価格買取制度などとも相まって急速に導入が進んでいる。四国電力管内においても、H28年4月末時点で既に178万kWのPVが接続済みとなっており、契約申し込み済みのものを含めると262万kWの導入量が見込まれている(図1)。

ところがPVの出力は天候に依存することから、大量導入時には日々の出力変動が中型の火力発電機数台分に達すると予想される。夏冬の重負荷期の需要が約500万kW、春秋の軽負荷期の需要が約300万kWである四国電力にとってPVの占める割合は大きく、PVの導入量増加に伴い電力の需給運用に大きな影響を及ぼすことが懸念されている。

そこで、我々はPVの出力を日々の需給運用における計画や制御に的確に組み込み、電力の安定運用が図れるように将来の出力を予測するシステムの開発を進めてきた^{1)~11)}。

これまでに、電力会社トータルのPV出力をリアルタイムに把握するPV出力実績推定システムを開発し、H26年10月から四国電力の中央給電指令所(以下、四電中給)において実運用を開始した。これに続き、H27年10月より将来のPV出力を予測するPV出力予測システムの実運用を開始したのでこれらのシステムの概要を紹介する。

本システムはH28年3月までに気象衛星ひまわり8号の10分データへの対応を完了し、現在2.5分データへの対応について検討を進めているが、本稿は技術開発の経緯等についても明らかにでき

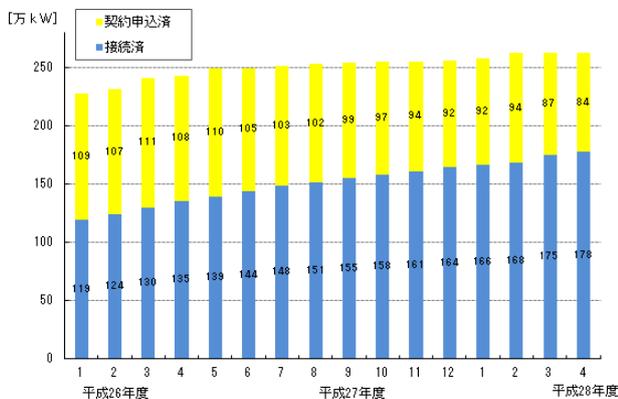


図1. 四国電力におけるPV設備の申込み状況 (H28/4末時点：四国電力のHPより)

るように、気象衛星ひまわり7号の可視画像(以下、衛星画像)使用時のシステムを中心に報告する。

2. 開発スケジュール

PV出力予測システムのこれまでの開発スケジュールを図2に示す。本システムはH21年に四国総合研究所(以下、四国総研)において基礎研究を開始し、予測手法に関する特許を出願(H27年4月に登録済)するとともに、H22年からは四国電力と協力しながら早期のシステム開発および実用化を目指して研究を進めてきた。

本システムはメガソーラなどの個々のPVではなく、電力会社管内のトータルのPV出力を算出して需給運用に活用することを主目的としたもので、PV出力実績推定システムとPV出力予測システムの2つで構成されている。

PVは家庭用に代表されるように規模の小さな設備が広い範囲に分散して設置されるため、現時点では一部の大規模PV発電所を除いて出力のオンライン計測を行っておらず、電力会社管内の総出力をリアルタイムに計測することはできない。しかし、PVの出力実績は、電力会社の需給運用の基盤となるロードカーブ管理において重要であるほか、PV出力予測システムの開発にあたっては出力実績値がなければ予測モデルのチューニングができないうえ、仮に予測値が計算できたとしても予測精度の評価すら行うことができない。そこで、我々は、電力会社管内のPV出力を正確に把握することが喫緊の課題であると考え、2つのシステ

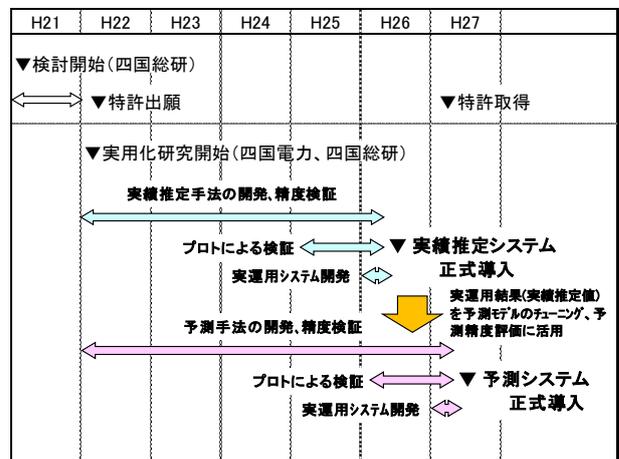


図2 PV出力予測システムの開発スケジュール

ムのうち PV 出力実績推定システムを先行して開発することとした。

PV 出力実績推定システムは H22～H24 年度の研究で推定精度などの面で実用化の見通しが得られたことから、H25 年度にプロトタイプシステムを構築して実時間での検証を行うとともに、運用者の意見や要望等も取入れながら改良を図った。その後、H26 年度上期にこれまでの研究成果をベースに信頼性の高い実運用システムを開発し、H26 年 10 月から四電中給において PV 出力実績推定値の本運用を開始した。

PV 出力予測システムについては PV 出力実績推定システムと平行して開発を行ってきたが、PV 出力実績推定システムの試運用や実運用を通して蓄積した PV 出力実績値を活用して予測モデルのチューニングおよび予測精度の評価を実施し、H26 年度にプロトタイプシステムによる検証を行った後、H27 年度上期に実運用システムを開発し、H27 年 10 月から四電中給において PV 出力予測値の本運用を開始した。

3. PV 出力実績推定システム

PV 出力実績推定手法の概要を図 3 に示す。本手法は四国内 5km メッシュの日射分布を把握する前半部と 5km メッシュの日射分布から PV 出力に変換する後半部の 2 つに大きく分けることができる。

このうち前半部の日射分布の把握は四国内 15 か所の日射計測値（四国電力において日射計を使ったリアルタイム計測を実施）と衛星画像を活用し、日射計測を行っているメッシュは日射計測値をそのまま用い、日射計測を行っていないメッシュは衛星画像から算定した推定日射を用いることで四国内 5km メッシュの日射分布を求めている。後半部の PV 出力への変換は 5km メッシュ毎に

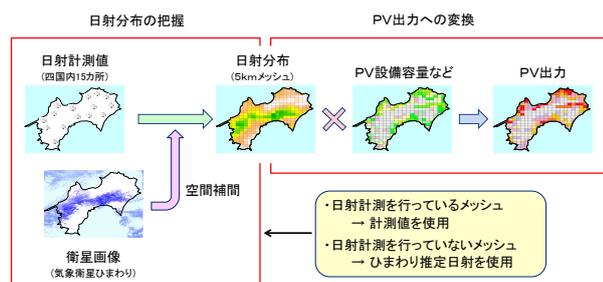


図 3 PV 出力実績推定手法の概要

PV の設備容量やパネルの設置状況、出力係数、自家消費などを考慮しながら PV 出力を計算し、全メッシュの出力を合計することで電力会社トータルの PV 出力に換算している。なお、都道府県別や電力会社の営業所別にメッシュ値を集計することにより、エリア毎の値を計算することも可能である。

3.1 日射分布の把握

前半部の日射分布の把握手法の詳細を図 4 に示す。上段の日射計測値は日射量であるためそのまま用いることができるが、衛星画像は雲や地面の反射能（アルベド）を観測しているために地面の日射量に変換する必要がある。そこで、図に示すように数多くの手法を組み合わせることで変換を行っている。これらの手法の概要を以下に示す。

(1)位置ずれ補正

衛星画像は日本領域において約 1.5km の解像度があるが、衛星にかかる引力などの外乱や姿勢制御などに伴うセンサーのぶれにより、観測画像に位置ずれが発生する可能性がある。このような場合、そのままでは衛星画像の画素と地面の緯度経度を正確に対応付けることができない。そこで、衛星画像における雲のない領域から読み取った海岸線などの情報をもとに画像を緯度・経度の方向に調整することで位置ずれの補正を行っている。

(2)日射変換モデル

衛星画像のアルベド値から地面の日射量への変換はファジィモデルを用いて行っている(図 5)。ファジィモデルは過去の実績データをもとに衛星画像のアルベド値と実際に日射計を使って観測した地面の日射量との相関関係を学習させている。

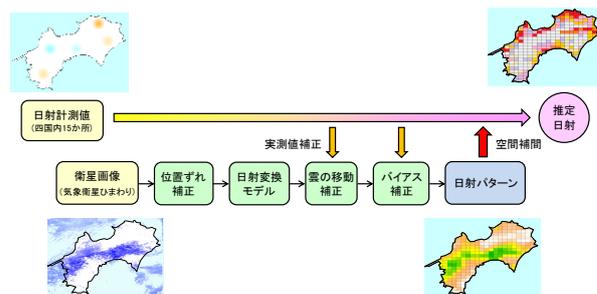


図 4 日射分布の把握

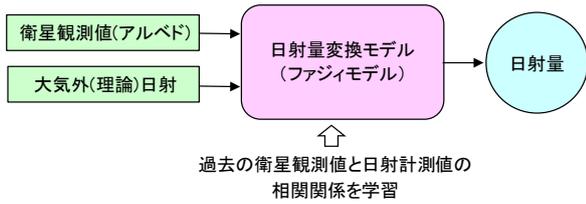
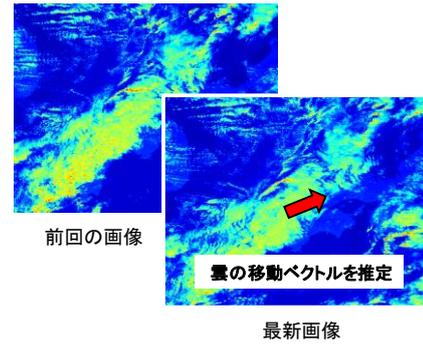


図5 日射量への変換



(3)雲の移動補正

衛星画像(日本領域)の観測間隔は30分もしくは(時間帯によっては)1時間間隔であり、データが配信されるまでの時間遅れもあるために、現在時刻の雲の状態を推定しようとするとき少なくとも30分程度、時間帯によっては1時間以上に観測した衛星画像を使わなければならない。

そこで、雲の移動を考慮するために、至近の衛星画像と最新の日射計測値から雲の移動ベクトルを推定し、衛星画像推定日射のパターンを緯度・経度の方向に補正する手法を開発した(図6)。

雲の移動ベクトルの推定は気象衛星センター等が実施している大気追跡風の算出¹²⁾に相当する計算を領域を限定するなどして簡易的に行うもので実際の衛星画像の雲の動きを基に推定することで精度向上を図っている。

なお、本手法は見方を変えると最新の衛星画像から1時間以上先の雲の状態を予測する手法と等価であることから、PV出力実績推定システムで開発したこのロジックを後述のPV出力予測システムの衛星画像予測にそのまま適用している。

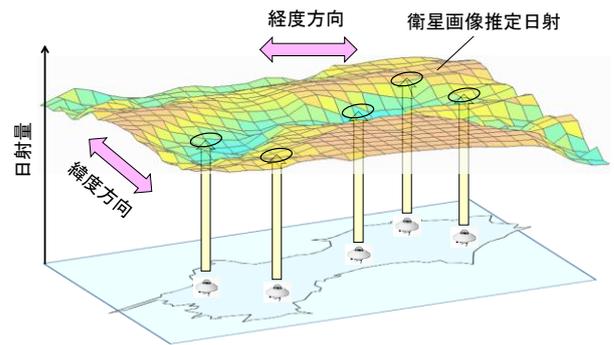


図6 雲の移動補正

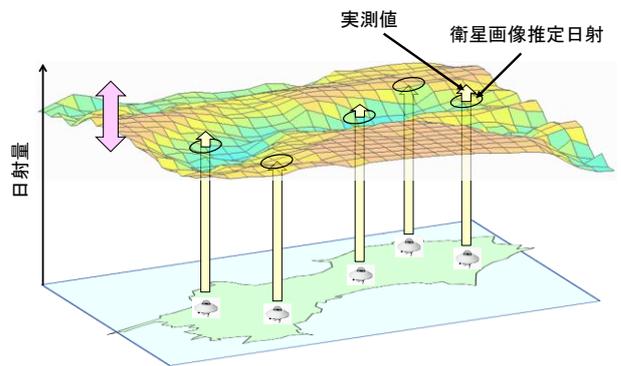


図7 衛星画像推定日射のバイアス補正

(4)バイアス補正

衛星画像のアルベド値から地面の日射量への変換はファジィモデルを使って行っているが、ファジィモデルだけでは時々刻々変化するエアロゾルなどの大気の状態を十分に考慮することができない。また、衛星画像自体にもいくらかの観測誤差が内在している場合がある。そこで、四国内15か所の日射計測値を用いて衛星画像推定日射を補正する手法を開発した(図7)。

図7の上向きの矢印の高さが各地点で観測した日射計測値(実際には15か所、ここでは5か所を表示)であるとすると、日射計測地点における衛星画像推定日射は日射計測値に一致するのが理想であるが、常にそのようになるわけではない。そこで、日射計測地点における誤差の総和がゼロと

なるように衛星画像推定日射を日射量の方向に微調整する。

図8にバイアス補正における推定精度の比較を示す。白抜きのプロットがバイアス補正なしの場合の地点別の推定誤差(RMSE)で 110W/m^2 前後の値であった。これに対してバイアス補正を行った場合の推定誤差は $50\sim 70\text{W/m}^2$ 程度まで改善されている。実際のバイアス補正は15地点全ての日射計測値を用いるが、ここでは14か所の日射計測値を用いてバイアス補正を行い、バイアス補正に用いなかった地点の推定誤差を評価する交差検証により地点別の推定精度を評価した。

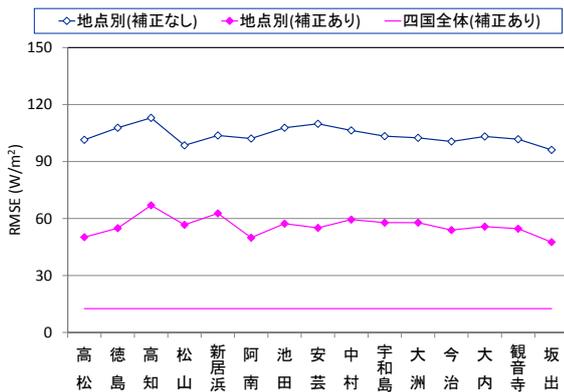


図 8 日射量の推定誤差 (30 分平均値)

また、PV の導入実績に基づいて地点別の重みを設定し、実測値とバイアス補正を行った場合の推定値（共に地点別の時系列データ）のそれぞれについて時間断面毎に地点別の重みをかけた加重平均値を求め、これを四国全体の平均日射として評価した結果、ならし効果等により推定誤差(RMSE)は 10 数 W/m² 程度まで低減できることが分かった。

個々の 5km メッシュ単位の日射量の推定精度向上は非常に重要であり、日射変換モデルの開発にも力を入れているが、推定誤差をゼロにできないのも現実である。一方、我々の指向しているシステムは電力会社の需給運用への活用を前提としており、電力会社トータルの出力を求めることを主目的としている。このため、個々のメッシュにおいてどうしても取りきれない推定誤差が若干残ったとしても、その誤差をできるだけ正負(±)に分散させる、即ち、あるメッシュで若干多めの推定がなされたとしても近傍のメッシュで若干少なめの推定となるように調整することで、電力会社トータルの推定精度を向上させることが可能になると考えられる。これを実現する手法がバイアス補正である。

(5)空間補間

気象条件によっては日射計測を行っているメッシュの値(日射計測値)と日射計測を行っていないメッシュの値(衛星画像推定日射)の間で段差が生じる場合がある。本手法では日射計測値を正としているため、日射計測値と相関があると考えられる日射計測メッシュ周辺の衛星画像推定日射を日射計測メッシュからの距離に反比例した重みを用

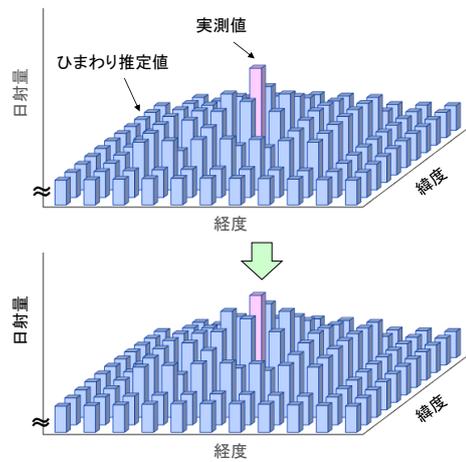
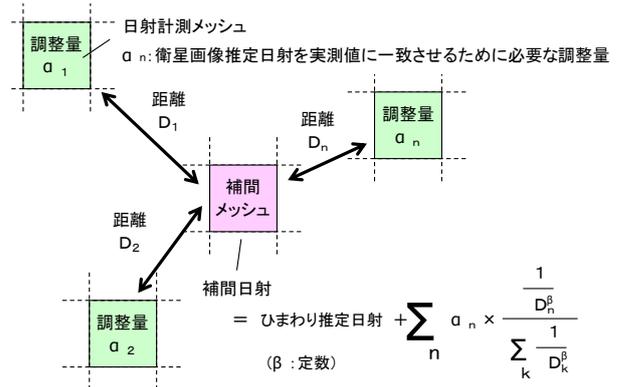


図 9 日射量の空間補間

いて微調整することにより不適切な変動が発生しないように調整している(図9)。

3.2 PV 出力への変換

後半部分の推定日射から PV 出力への変換手法の詳細を図 10 に示す。5km メッシュ毎に水平面推定日射と PV の設備容量等を掛け合わせて PV の出力を求めることを基本とするが、PV パネルの設置状況や自家消費の違いなどを考慮するために、低圧連系 10kW 未満、低圧連系 10kW 以上、高圧連系の 3 つに分けて変換する。

それぞれの連系種別毎に、PV パネルの設置状況として、方位角を東・南・西の 3 通り、傾斜角を 10・20・30 度の 3 通りの合計 9 パターンに分類してそれぞれの設置割合を設定し、この割合に応じて水平面の推定日射を傾斜面の平均日射に変換している^{13)~15)}。設置割合は全メッシュ共通としているが、公開されている統計資料や論文等¹⁶⁾を参考に初期値を設定し、システム全体のチューニングや精度検証の段階で最終調整を行った。

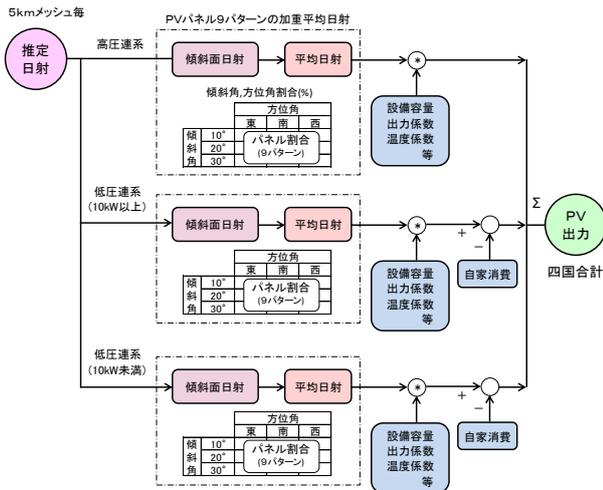


図 10 PV 出力への変換

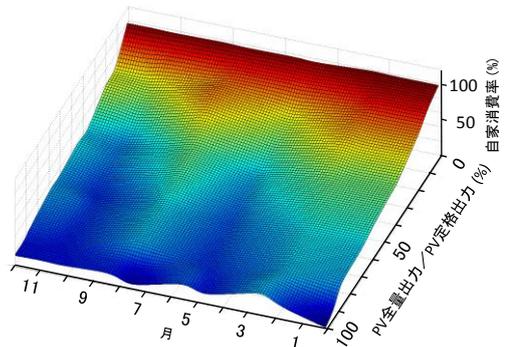
メッシュ毎の平均日射に PV の設備容量や出力係数、温度補正係数などを掛け合わせて PV の全量出力を求め、低压連系については自家消費を差し引くことで余剰電力に換算する。

このうち、PV の設備容量についてはパネル容量よりも PCS 容量の方が小さいシステムが増加傾向にあることが分かった。そこで、これらの影響も考慮できるようにパネル容量と PCS 容量の両方の値を使用し、パネル容量を基に計算した PV 出力に対して、PCS 容量を基に整定した上限値を使って制約を掛けることで、PCS 容量とパネル容量の両方を考慮できるロジックを開発し、現在検証を進めている。また、PV パネルの温度を推定するために必要な気温や風速等は気象庁の数値予報の最新値を用いている。

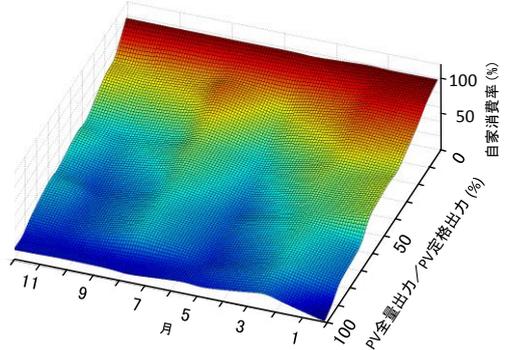
自家消費については、低压連系 10kW 以上は研究段階のチューニングにおいて実績値との対比から固定価格買取制度開始前の余剰買取残置分が幾らかあると判断されたことから初期値として数%を見込んだが、現在は全てが全量買い取りであるため、導入実績に合わせて適切な値に調整している。

一方、低压連系 10kW 未満については、H23 年から 3 年間の四国内のロードサーベイデータを基に自家消費モデルを構築した(図 11)。モデルは平日(月～金)と休日(土、日)に分けており、月別に作成したモデルを滑らかにつなぎ合わせることで年間の自家消費モデルとしている。

最後に、5km メッシュ毎、連系種別毎に求めた PV 出力を全て足し合わせることで電力会社トータルの PV 出力としている。



(a) 平日(月～金)



(b) 休日(土、日)

図 11 自家消費モデル

3.3 推定精度の評価

電力会社トータルの PV 出力については時系列の実績値がないことから、唯一実績値のある電力会社の PV 購入電力量(月量)を用いて推定精度の評価を行った。

PV 購入電力量は低压連系 10kW 未満については電力会社の検針員が各家庭等を巡回して電力メータの検針を行っている。図 12-(a)に H26 年の 5 月から 6 月にかけての低压連系 10kW 未満の PV 出力実績推定値の日量を示す。5 月は比較的天気良かったために日量の大きい日が多かったが、6 月になると梅雨などの影響により日量が少ない日が多くなっている。

1 日単位で前 30 日間の日量の積算値を計算すると同図(b)のようになり、同じ PV でも 6 月 1 日に検針すると検針値は大きくなるが、6 月 30 日に検針すると検針値は小さくなるなど、検針日によって検針値が大きく変化することが分かる。

長い期間の電力量を評価する場合には検針日ずれの影響はほとんどなくなるが、月別などの短期間の評価では、期間中に天候が大きく変化するような場合、検針日ずれの影響が無視できなくなることがある。このため、同図(b)に示すように 6 月

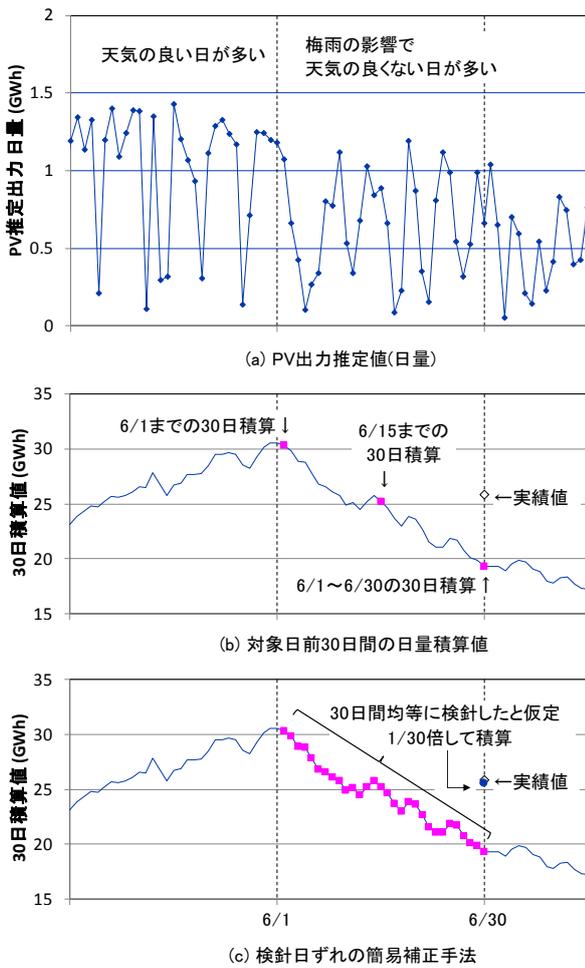


図 12 検針日ずれの補正

の実績値（PV 購入電力量）と PV 出力実績推定値の 6 月 1 日から 6 月 30 日までの積算値を比較すると比較的大きな差が生じている。

電力メータの検針は多くの検針員が広い電力会社管内をほぼ 1 か月かけて順番に検針していることから、休日など検針のない日があるものの押し並べて考えると日々平均して検針を行っていると考えられる。

そこで、毎日全体の 30 分の 1 の PV について検針を行ったと仮定して、前 30 日間の日量積算値を $1/30$ 倍しながら 30 日間積算して PV 出力実績推定値の月量を計算した結果、同図(c)に示すように実績値と良く一致する結果が得られた。

このような方法で検針日ずれの補正を行った上で、月量を評価した結果を図 13 に示す。月別に見ると多少誤差の大きい月もあるものの、期間全体で見た場合の PV 出力実績推定値の誤差は実績値の 2% 程度であることが確認できた。

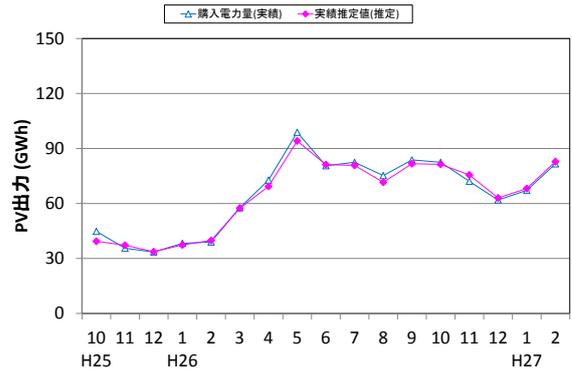


図 13 実績推定精度の評価

電力会社トータルの PV 出力については時系列の実測値がないことから、可能な限り信頼性の高い手法を活用して丁寧に算定する必要がある。月量ではあるもののこのような高い精度で推定できたのは日射計測値を最大限活用したことなどによる推定精度の向上が貢献していると考えられる。

本システムは推定精度の面で不利ではあるが、必ずしも日射計測値を使わなくても PV 出力実績の推定計算を行うことができる。このため、後で述べる実運用システムでは、仮に日射計測値が途絶えた場合には衛星画像のみを用いて推定計算を継続し、衛星画像が長時間にわたって途絶えた場合には日射計測値のみを用いた日射量の空間補間により推定計算を継続する仕組みを導入している。

今後、PV 出力実績推定システムの実運用を通して信頼できる PV の出力実績が十分蓄積できれば、次のステップとして日射計測値を使わなくても同様の精度が得られる手法の開発やシステムの移行も可能と考えている。

また、衛星画像の解像度が 1.5km なのに対して、本システムでは日射量推定のメッシュサイズを 5km としているが、これは衛星画像に位置ずれ補正や雲の移動補正を適用しても常時 1.5km の精度で画素と地面の緯度・経度を対応付けるのが容易ではないこと、個々の PV 出力ではなく電力会社トータルの PV 出力の推定を指向していること、後で述べる気象庁の数値予報(MSM)のメッシュが 5km であることなどに基づいて設定した。

ひまわり 8 号では観測精度が格段に向上していることから、位置ずれ補正などの高精度化を図ったうえでメッシュを細分化することで大規模 PV 発電所など個別の PV への対応も可能であると考えられる。

4. PV 出力予測システム

PV 出力予測手法の概要を図 14 に示す。PV 出力実績推定手法と同様に四国内 5km メッシュの日射量を予測する前半部と 5km メッシュの日射量から PV 出力に変換する後半部の 2 つに大きく分けることができる。

このうち前半部の日射量の予測は、今回新たに開発した気象庁の数値予報を使う手法（①数値予報予測）と PV 出力実績推定システムで実用化済みの衛星画像を使う手法（②衛星画像予測）を併用するハイブリッド方式を特徴としている。

後半部の PV 出力への変換は基本的に PV 出力実績推定システムで実用化した手法と同じであるが、特高メガソーラについては発電所毎に出力を求める方式を新たに開発した。

4.1 日射分布の予測

四国内 5km メッシュの日射分布を予測するための数値予報予測と衛星画像予測の手法はそれぞれ以下のような特徴を有している。

①数値予報予測

[手法] 気象庁の数値予報 (LFM、MSM、GSM) の雲量、湿度、気温、降水量の値を用いて、ファジィモデルにより日射量を予測する。ファジィモデルは過去の実績データに基づき数値予報の値と実測日射の相関関係を学習させている。なお、LFM は予測精度の向上というよりは 30 分間隔の予測値を求めるために使用している。

[長所] 数値予報は気象モデルを使った物理シミュレーションであるため、最大 11 日程度先までの長時間の予測が可能である。

[短所] 気象庁の数値予報モデルにアメダス等の実績値が取り込まれ、予報計算が行われて結果が配信されるまでに時間を要することなどにより、気象の変化が激しく予報が難しい場合などは、数値予報が手元に届いた時点で最新の予報値に比較的大きな誤差が含まれる場合がある。

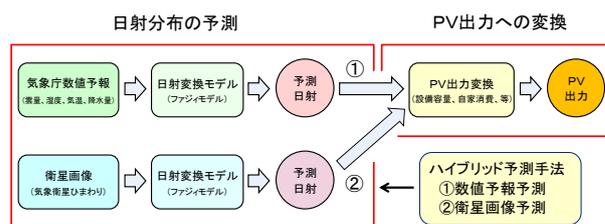


図 14 PV 出力予測手法の概要

②衛星画像予測

[手法] 衛星画像を用いて雲の移動を考慮しながら日射量を予測する。H26 年 10 月に実運用を開始した PV 出力実績推定システムで開発した雲の移動補正の手法を活用している。

[長所] 気象衛星は実際に雲などの状態を観測していることから、数値予報の初期値と比べて前線の位置や雲の広がりなど、最新かつ比較的正確な日射の状況とトレンドの把握が可能である。

[短所] 雲の移動のみによる予測であり、形状変化等は十分には考慮できないため、数時間先までの予測が限界である。

本システムでは①数値予報予測の日射量を基本的に採用するが、最新の数値予報において大きな誤差があると判断した場合には最新の時間断面において正確な値を有している②衛星画像予測に切り替えることで、短時間先の予測精度の低下を防いでいる。

このため衛星画像予測への切り替えは数値予報予測では大外しの可能性が大きいと判断した場合に限定される。これは平常時の短時間先予測は後述の実績値補正の効果が大きいため、数値予報予測でも衛星画像予測でも予測精度に大きな違いが見られなかったためである。また、誤差が大きいと判断した数値予報予測値は捨て、あえて両予測値を常に併用することは行っていない。

4.2 PV 出力への変換

後半部の予測日射から PV 出力への変換手法の詳細を図 15 に示す。低圧連系 10kW 未満、低圧連系 10kW 以上、高圧連系については PV 出力実績

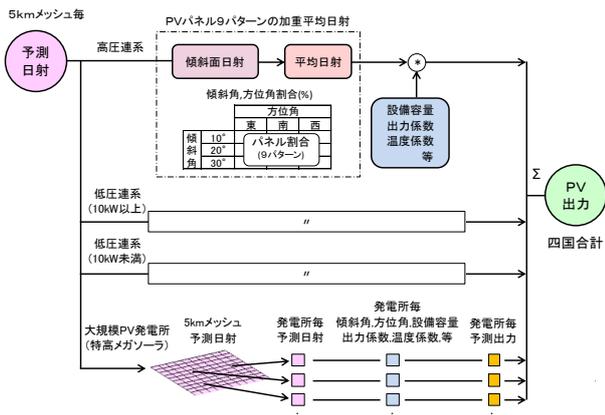


図15 PV出力への変換

推定システムで既に実用化済みのロジックをそのまま採用した。

特高メガソーラについては発電実績を収集していることからPV出力実績推定システムでは計算を行っていないため、出力予測用に新たに開発した。特高メガソーラは規模が大きく、地点数もある程度限定されることから発電所毎に設備容量(パネル容量よりPCS容量の方が小さい発電所が多い)やパネルの角度、出力係数などの定数を実態に合わせて設定し、発電所毎の出力を求めるロジックとしている。

PV出力への変換後、最新の出力実績値を用いて補正を行うことで短時間先の予測精度向上を図っている(図16)。実績値補正は最新の予測値と実績値の誤差を求め、これに重み係数を掛けた値を使って将来の予測値を微調整する単純な手法で、重み係数は過去実績を基に予測誤差が最小になるように整定している。

図17に予測時間と年間の予測誤差の関係を示す。実績補正を行わない場合の数値予報予測は初期値(0時間先)でもある程度大きな誤差が含まれているが、衛星画像予測は初期値として推定実績を用いているために短時間先の予測精度は衛星画像予測の方が良好な結果となる¹⁷⁾。このようなことから、一般的には予測精度が逆転する時間(Ts)で予測手法を切り替えて使用することが考えられている。

本システムでは実績補正を行うことで数値予報予測の初期値の誤差は衛星画像予測と同一となるため、短時間先の予測精度は衛星画像予測と同程度となることが確認できた。本システムが基本的

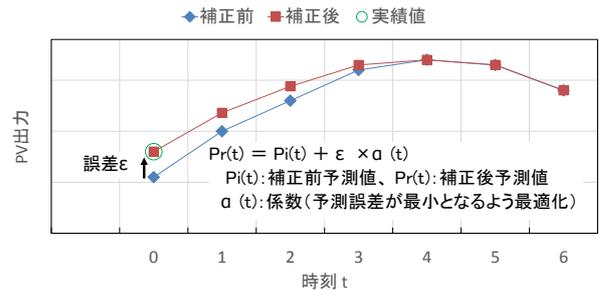


図16 PV出力予測値の実績値補正

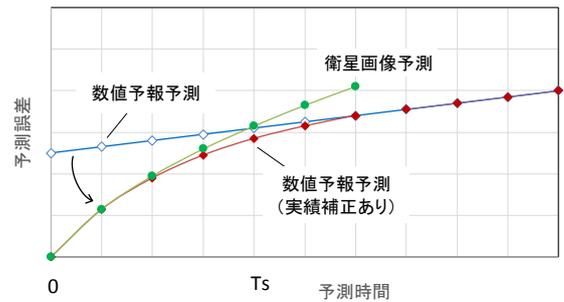
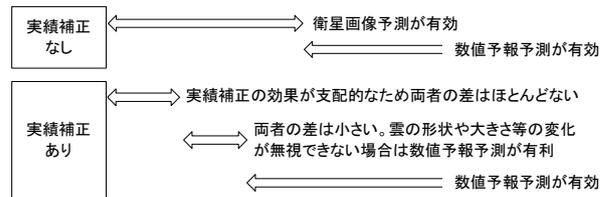


図17 実績値補正の効果

に数値予報予測を用いるのはこのような理由からである。

4.3 予測精度の評価

H26年1月から12月までの1年間についてPV出力の比較的大きい10時から14時の時間帯の予測値を絶対平均誤差(MAE)と二乗平均平方根誤差(RMSE)を使って評価した。

数値予報は局地モデル(LFM)、メソモデル(MSM)、全球モデル(GSM)の3種類を用い、毎正時の時点において気象協会から受信済みのデータのうち、予測対象時刻における最新データを使用することとした(図18)。例えば、0時の予測計算は前日の23時台に受信したLFM(実質7時間先まで)とMSM(8~36時間先まで)、前日の18時台に受信したGSM、前日の3時台に受信したGSMが対象となるが、数値予報が更新されない37時間先以降は前回までに計算した予測結果をそのまま用いている。

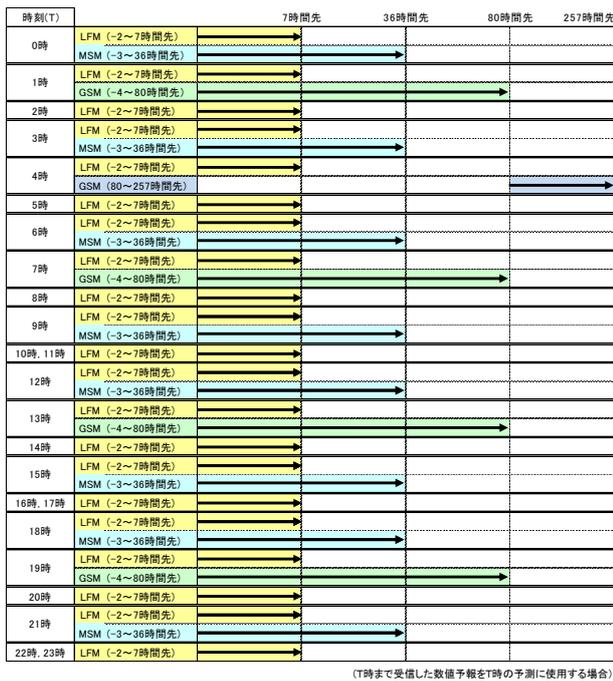


図 18 予測時刻と数値予報の取り込みタイミング
(数値予報は気象協会経由で受信)

図 19 に 24 時間先の予測誤差と PV の設備容量を同一スケールで示す。設備容量に対して予測誤差は何れの月もかなり小さくなっており、最も大きな月でも設備容量の 10%程度であることが確認できた。

評価を行った 1 年間に PV の設備容量が 60 万 kW 程度から 100 万 kW 近くまで大きく増加したことから、PV の設備容量に対する比率で予測誤差と予測時間（何時間先を予測したか）の関係を評価した結果を図 20 に示す。MAE（括弧内は RMSE）は 1 時間先で 3.9% (5.3%)、24 時間先で 8.7% (11.5%)、48 時間先で 10.0% (13.0) と国内外で開発されている同様の PV 出力予測システムと遜色ないレベルであることが確認できた。

なお、本予測手法は気象庁の数値予報への依存度が高いことから、数値予報が外れた場合には PV 出力予測の精度も悪化する傾向が見られた。

5. 実運用システム

PV 出力実績推定手法と PV 出力予測手法の全体構成を図 21 に示す。これら 2 つの手法を組み込んだ実運用システムを構築したが、引き続き予測精度向上等の研究を継続していることもあり予測システムは四国総研に設置し、風力出力予測システ

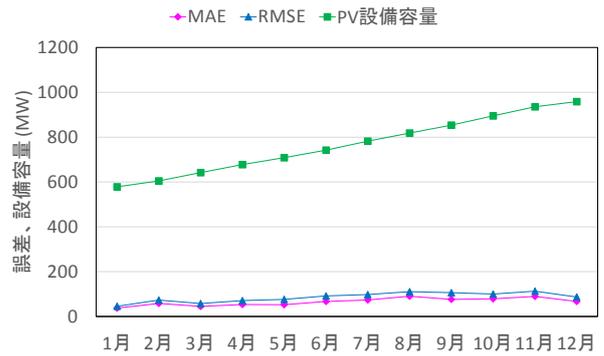


図 19 月別の予測誤差(24 時間先, 10 時~14 時)

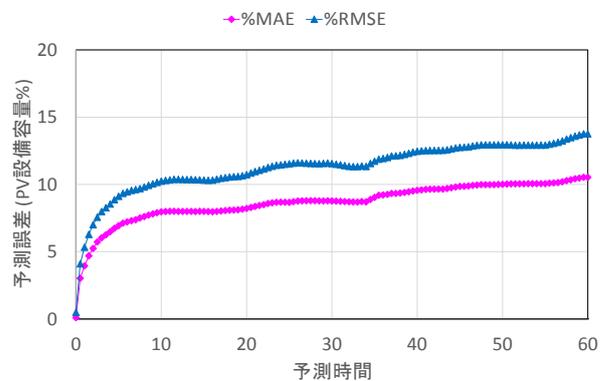


図 20 予測時間と予測誤差(10 時~14 時)

ム（H22 年に実運用開始）と一体で運用している（図 22）。

本手法は演算処理が非常に軽いため、実運用システムは 10 万円クラスの OA 用パソコン（PC）と MS-Windows 7 で構築している。但し、給電設備に相当する重要機器であることから十分な信頼性を確保する必要があり、PV 出力実績推定システムと PV 出力予測システムのそれぞれを運用系と待機系、試験系の 3 系列で構成し、計 6 台の PC で運用している。その他、数値予報等受信用 PC と保守メール送信用 PC は風力出力予測システムと共用している。

常時は運用系と待機系、試験系の 3 台の PC は同一の計算を行っており、運用系のみが四電中給へのデータ配信を担当しているが、待機系は運用系の動作状況を常に監視しており、運用系に異常が発生した場合には自動で待機系に切り替わる仕組みとなっている。

試験系は PV の設備容量マップの更新(毎月 1 回)や、プログラムの改良等の際に試験・検証用とし

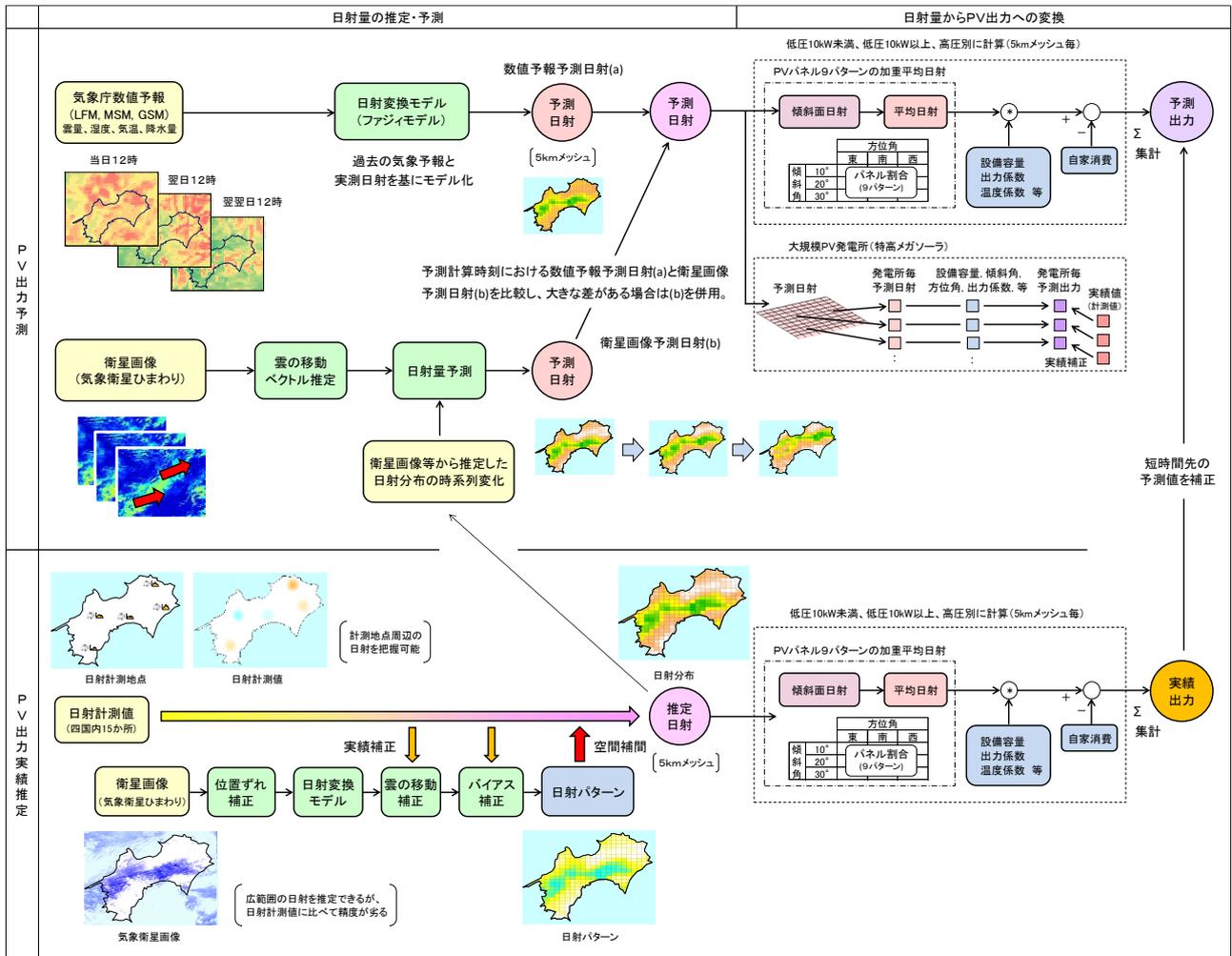


図 21 PV 出力実績推定・予測システムの全体フロー



図 22 予測システムの外観

で使っているが、マウスによるボタン操作でモードを切り替えることで運用系として動作させることも可能である。

システムの動作状況は携帯メールを使ってシステム管理者に通知しており、万一異常が発生した場合にも迅速な対応が取れる体制を構築している

が、幸いにもこれまでに大きなトラブル事例は発生していない。

予測システムと四電中給システムとの間のデータの流れを図 23 に示す。予測システムは四電中給で収集した日射計測値や PV 出力等の実績値をネットワーク経由で参照するとともに、気象庁の数値予報や衛星画像データを気象協会から受信し、PV の出力実績推定および出力予測の計算を行った後、演算結果を四電中給に配信している。

データの更新間隔は PV 出力実績推定値が 1 分、PV 出力予測値が 30 分としている。四電中給では受信したデータに基づき、実績値や予測値を当直員の指令卓のディスプレイにグラフ形式や表形式で表示するとともに、計画システムにも転送して電力の需給運用に活用している。

予測結果の表示画面の一例を図 24 に示す。画面表示は要望に応じて作り込みが可能であるが、こ

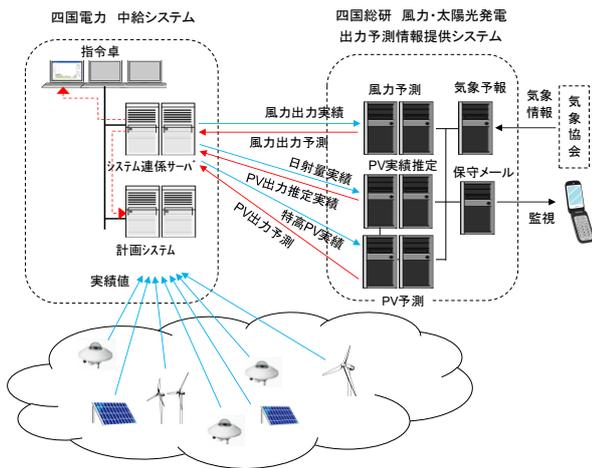
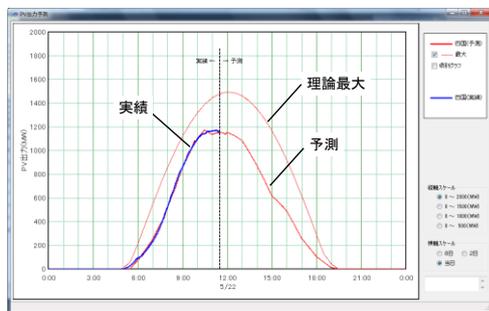
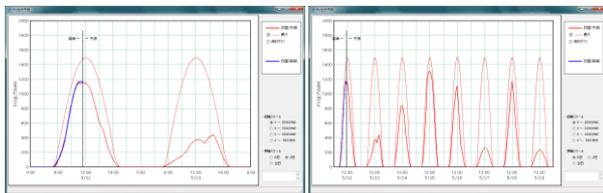


図 23 予測システムのデータの流れ



(a) 当日表示



(b) 当日・翌日表示

(c) 8日間表示

図 24 予測結果の画面表示の一例

ここでは四国総研側の画面を載せている。予測値と一緒に現在時刻以前は実績値を表示するとともに、四国全体が快晴と仮定した場合の理論最大値も併せて表示することで PV の発電出力レベルを分かりやすくしている。

弊社では 6 年前に実運用を開始した風力出力予測システムの開発にあたり、パソコンレベルで実行可能な安価なシステムの実現をめざし研究開発を進めた。その結果、パソコン上動作するにも関わらず、当時主流であった高価な計算機システムを駆使した手法と同程度の精度を有する予測システムの開発に成功した。

今回開発した PV 出力予測システムでもこの方針を踏襲しており、演算時間は気象予報や衛星画像のバイナリ形式から CSV 形式への展開を除き（フォーマットにより時間が異なるため）、1 分間隔で実行する PV 出力実績推定計算が 1 秒程度、1 時間間隔で実行する LFM を使った 7 時間先までの PV 出力予測計算が 30 秒程度、30 分間隔で実行する PV 出力予測の実績補正計算が瞬時であるなど非常に軽いシステムとなっている。また、プログラム自体も小さく、USB メモリー等にデータと一緒に入れておけば、インストールの必要もなく任意の PC で試用することが可能である。もちろんネットワーク経由で数値予報等のデータを参照することができれば実運用システムと同一の計算を行うことも可能である。

このように本手法は処理が非常に軽く他のプロセスへの負担が少ないことや電力の自由化が進む中で出力予測の重要性がますます増大すると考えられることから、PV 出力実績推定、PV 出力予測、風力出力予測の 3 つのプログラムを四電中給のサーバ用に移植し、サーバ上で直接実行することにより一層の信頼性向上を図る計画としており、現在その作業を進めているところである。

6. まとめ

四国電力の中給電指令所において実運用を開始した PV 出力実績推定システムと PV 出力予測システムの概要を紹介した。

今後、実運用結果も踏まえながら更なる推定・予測精度の向上を図るとともに、出力予測における信頼区間の設定などシステムの高度化について研究を進める予定である。

【謝辞】

本研究は、弊社の自主研究に引き続き、四国電力(株)系統運用部より委託を受けて実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 瀧川他：“ファジィ回帰を用いた太陽光発電出力予測の一検討”，電気学会電力・エネルギー部門大会，101（2011）

- 2) 瀧川：“日射量推定のための気象衛星ひまわり画像の位置精度に関する一考察”，電気学会全国大会，6-017（2012）
- 3) 瀧川：“補間を用いた日射強度分布の推定についての一考察”，電気学会電力・エネルギー部門大会，231（2013）
- 4) 瀧川：“衛星画像を用いた地域トータルの太陽光発電出力推定の一検討”，太陽エネルギー学会，111（2013）
- 5) 瀧川：“風力発電および太陽光発電の出力予測システムの開発”，電気学会電子・情報・システム部門大会，0S-9-7（2014）
- 6) 瀧川：“ICT を活用した風力・太陽光発電出力予測システムの開発”，電力技術懇談会講演会（2014）
- 7) 瀧川：“太陽光発電出力実績推定システムの開発”，四国電力，四国総合研究所 研究期報 101（2014）
- 8) 瀧川：“太陽光発電出力実績推定精度の一評価”，6-074，電気学会全国大会（2015/3）
- 9) 瀧川：“太陽光発電出力実績推定結果に関する一考察”，227，電気学会 B 部門大会（2015/8）
- 10) 瀧川：“太陽光発電出力予測システムの開発”，太陽エネルギー学会（2015/11）
- 11) 瀧川：“太陽光発電出力予測システムの開発”，新エネルギー・環境/メタボリズム社会・環境システム合同，FTE-16-008，MES-16-008（2016/2）
- 12) 林，下地：“大気追跡風算出アルゴリズム”，気象衛星センター技術報告 第 58 号（2013/2）
- 13) JIS：“太陽光発電システムの発電電力量推定方法”，C8907（2005）
- 14) 松川，山田，塩谷，黒川：“多面アレイ構造太陽光発電システムに対応したシミュレーションの開発”，電学論 B，Vol. 124，No.3 P 447-454（2004）
- 15) NEDO：“太陽光発電システム共通基盤技術研究開発報告書”（2007）
- 16) 大関，Joao，高島，荻本：“太陽光発電システムの代表的な発電量データセットに関する検討”，電気学会メタボリズム社会・環境システム研究会，FTE-11-029，MES-11-015（2011）
- 17) Richard Perez et. al：“Validation of short and medium term operational solar radiation forecasts in the US”，Solar Energy, in press（2010）

