

太陽光発電出力実績推定システムの開発

(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
日射量
衛星雲画像
需給運用

Key Words : Photovoltaics
Output Estimation
Solar Radiation
Satellite Cloud Image
Demand and Supply Operation

Development of PV Output Estimation System

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. So, we need to effectively use their generated power in the planning and controlling of an electric power system. But we can't measure the total PV output, because a lot of PV systems are installed in wide area.

We developed the estimation system of PV output in real time using measurements of solar radiation and cloud image of meteorological satellite. We are practically utilizing this system for controlling and planning of electric power system.

In this paper, we explain about the outline of estimation method of PV output and accuracy of estimated result in this system.

1. はじめに

太陽光発電 (PV) は発電中に CO₂ 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、大量導入が推進されている。ところが、PV などの自然エネルギーを用いた発電は、出力が天候に依存することから、電力系統に大量に連系すると需給運用などに影響を及ぼすことが懸念されている。

電力需要は時刻や季節・天候などで変化するものの、社会の動きに密着しており一定の精度で予測することが可能で、電力会社では予測した電力需要に合わせて需給運用を行っている。

しかし、PV の出力は天候に依存し、社会の営みとは無関係に変化する。このため、電力系統の需給運用を適正に行う上で、PV の出力も電力需要と同様に精度良く予測することが課題になっている。

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、安定運用を図れるよう、将来の出力を予測するシステムの開発を進めている^{1)~16)}。

PV は家庭用に代表されるように、比較的小規模の設備が広範囲に分散して連系されることが多いため (図 1)、現時点では全ての出力実績をリアルタイムに測定することはできない。しかし、PV の出力実績は、需給運用の基盤となるロードカーブ管理に重要であるほか、将来の出力を予測する上で予測モデルの構築や予測精度の検証に欠かすことができない。

そこで、PV の出力予測に先立ち、PV の出力実績を推定するシステムの実用化を図ったのでその概要を紹介する。

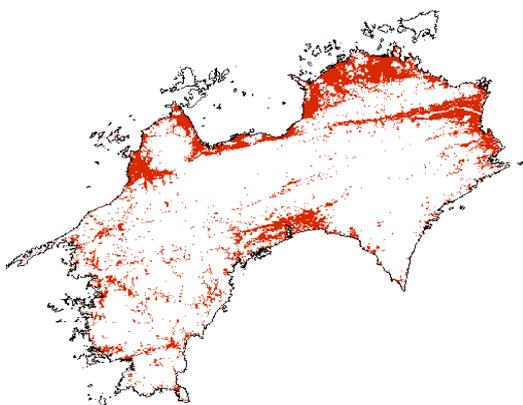


図 1 PV の導入分布(平成 26 年 7 月時点)

年度	開発状況
H21	推定手法の開発、特許出願
H22	
H23	
H24	
H25	プロトタイプシステム開発、推定精度検証
H26	実運用システム開発
	◆ PV出力実績推定システム正式導入
H27~	推定精度検証、推定精度向上研究

図 2 PV 出力実績推定システムの開発

2. 開発スケジュール

PV 出力実績推定システムの開発の概要を図 2 に示す。PV の出力実績推定は平成 21 年に基礎研究に着手し、平成 24 年度までに推定計算の主要部分について手法を確立した。

そこで、平成 25 年度にプロトタイプシステムを構築するとともに、試運用を通して推定精度の評価や精度向上策等について研究を実施した結果、実用化の見通しを得ることができた。

そこで、PV の急速な導入が進む中、PV 出力実績推定システムの早期の実用化の要望を踏まえ、平成 26 年 4 月に実運用システムの開発に着手し、7 月からの試運用を経て、10 月から四国電力の中央給電指令所において正式運用を開始した。

以降も推定精度の検証ならびに更なる推定精度向上について研究を継続している。

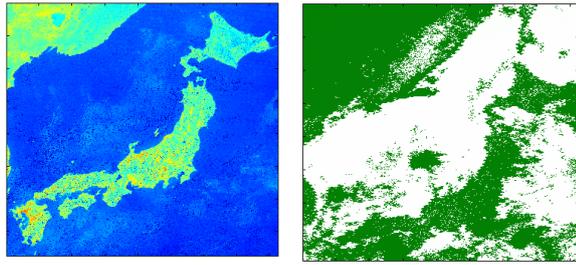
3. PV 出力実績推定手法

日射量と PV 出力の間には比較的良好な相関があることから、四国エリアの日射分布を正確に把握することができれば、それをベースに PV の出力を推定することが可能となる。

そこで、PV 出力実績推定システムでは図 3 に示すように四国エリアの日射分布を推定する部分と推定した日射分布に基づき PV の出力に変換する部分の 2 つに分けて開発、精度検証等を実施した。

3.1 日射分布の把握

日射計を用いて日射量を測定する方法は、リアルタイムに高精度の値が得られる反面、日射計を設置した周辺の日射しか測定することができない。このため、多数の日射計を設置してオンラインで



過去の衛星画像を基に作成した海・陸の領域情報
位置ずれのある画像の一例

図 6 衛星画像の位置ずれ補正

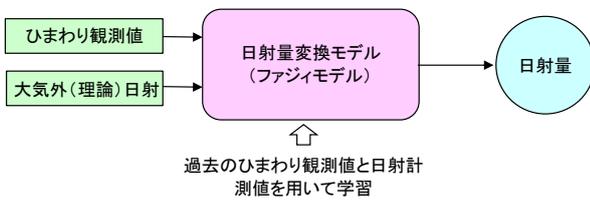


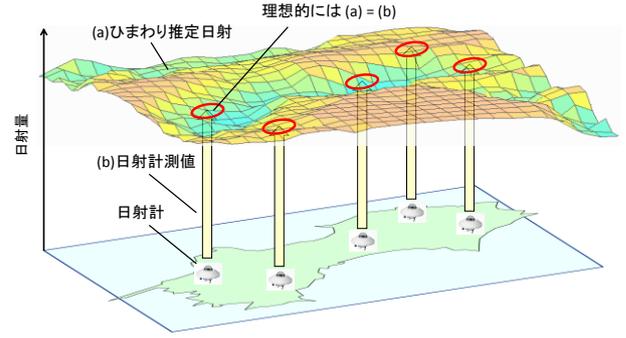
図 7 ひまわり観測値の日射量への変換

陸を区別するための領域データを作成しておき、推定計算に用いる観測画像の海の領域が領域データの陸の部分と重ならないようにパターン補正を行うことで位置ずれの低減を図っている(図 6)。

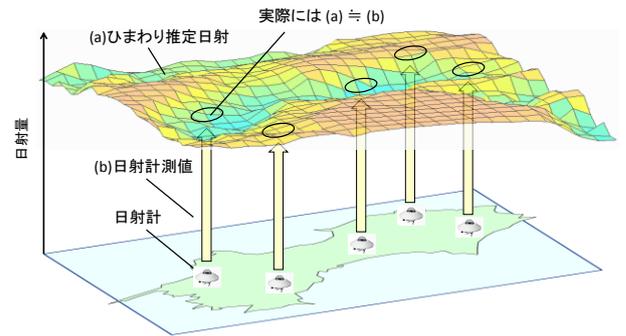
(2) 日射量への変換

統計モデルの一種であるファジィモデルを用いて気象衛星ひまわりの観測値(アルベド)を地面の日射に変換する手法を開発した。ファジィモデルは過去の気象衛星ひまわりの観測値とそれに対応する日射計測値の関係を学習させることにより作成した(図 7)。

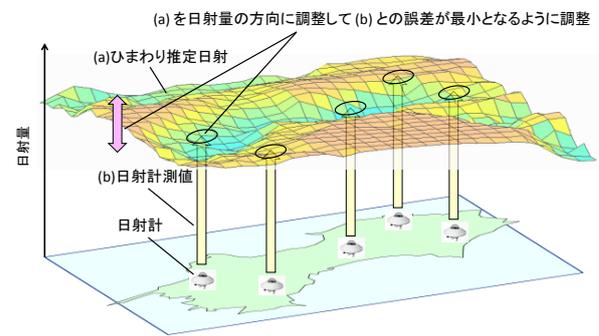
日射量への変換は統計モデルの他に物理モデルを用いる方法があるが、本推定システムはメガソーラー単体のような個別の PV ではなく、電力会社全体のトータルの PV 出力を推定することを目的としていることや、統計モデルだけではなく次に述べる実績値補正(バイアス補正、雲の移動補正等)を組み合わせることで十分な推定精度を確保できたことから統計モデルを採用することとした。従って、推定精度を確保するためには、必要な地点数の日射計測値をリアルタイムに収集することが必要となる。



(a) 理想状態



(b) バイアス補正前



(c) バイアス補正後

図 8 ひまわり推定日射のバイアス補正

(3) バイアス補正

理想的には日射計測地点におけるひまわり推定日射は日射計測値に一致する(図 8-(a))が、実際には多少の誤差が含まれる場合(図 8-(b))が多い。

これは、統計モデルを用いて日射量に変換しただけでは時々刻々変化する大気の状態や気象条件等を十分に考慮できない場合があったり、気象衛星ひまわりの観測値自体に誤差が含まれる場合があったりするためである。

そこで、ひまわり推定日射のパターンを日射量の方向に微調整することにより日射計測地点にお

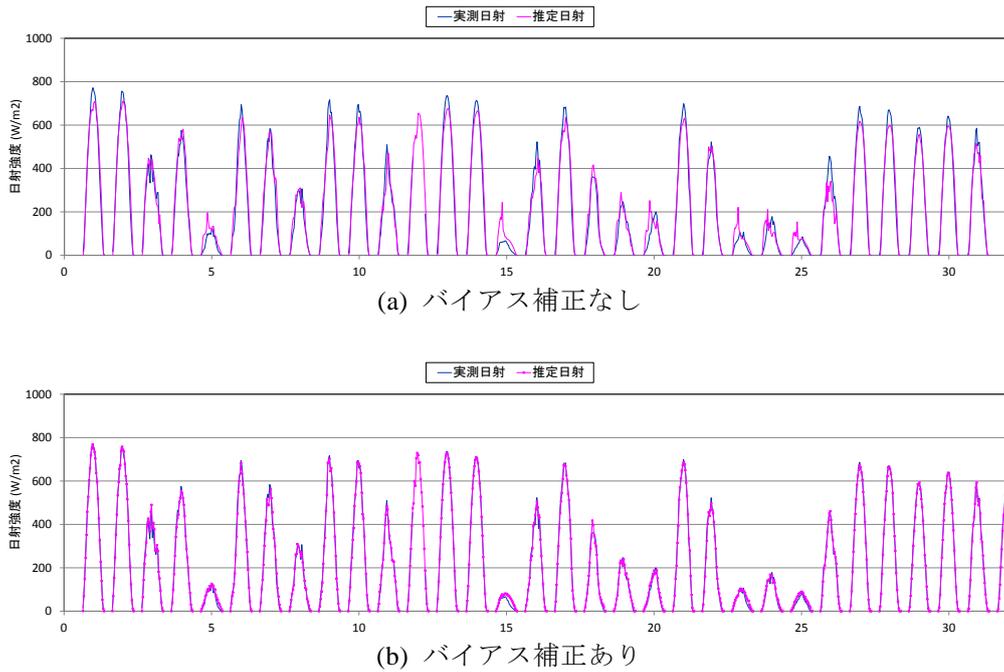


図9 ひまわり推定日射のバイアス補正の効果

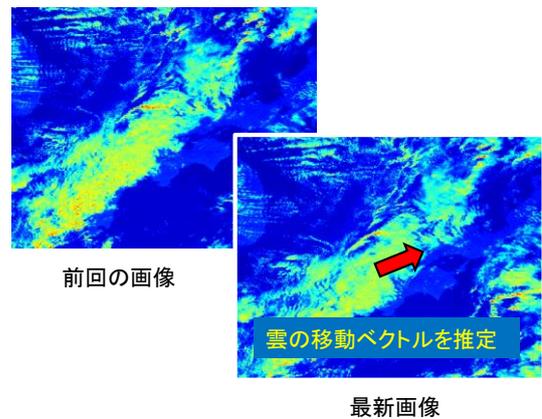
けるひまわり推定日射と日射計測値の誤差が極力小さくなるように補正を行う（図8-(c)）。

図9にバイアス補正なしとありの場合のひまわり推定日射の波形例を示す。バイアス補正を行わない場合にはスパイク状の誤差が発生したり、推定値が多めに計算されたり少なめに計算されるケースが多くみられるが、バイアス補正を行うことで推定誤差は格段に少なくなっており、推定精度が向上していることがわかる。

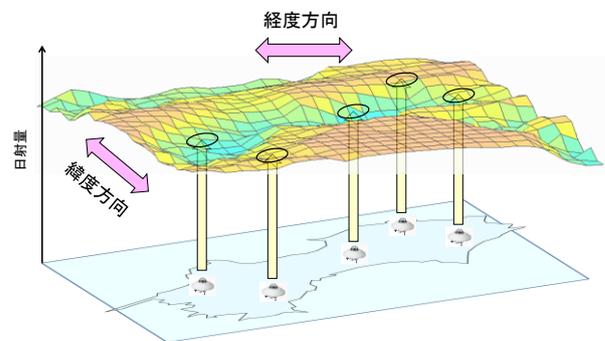
(4) 雲の移動補正

気象衛星ひまわりの観測間隔は約 30 分であるが、データが手元に届くまでに数十分の遅れがあるほか、観測開始が9時と15時のデータについては北半球が観測されない。また、1分間隔で日射量を推定することから、雲の移動に合わせてひまわり推定日射のパターンの位置を調整しなければならない。

そこで、図10に示すように、至近の連続する衛星画像から雲の移動方向と移動速度を推定し、それに合わせてひまわり推定日射のパターンを緯度・経度の方向に移動させるとともに、移動後のひまわり推定日射と日射計測値を比較して両者の誤差が最小になるようにひまわり推定日射のパターンを微調整している。



(a) 雲の移動ベクトル推定



(b) ひまわり推定日射の位置補正

図10 雲の移動補正

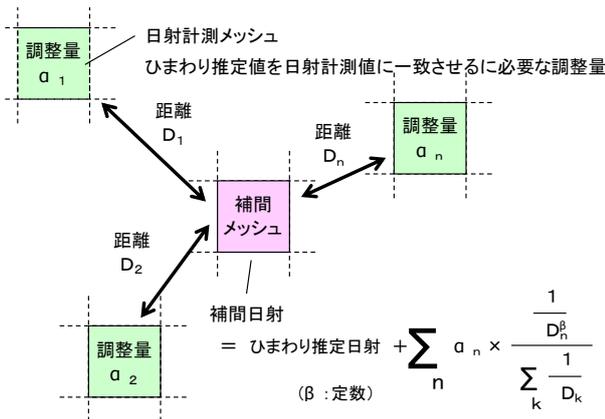


図 11 日射計測値の空間補間

なお、次期気象衛星（ひまわり 8 号、平成 27 年度中に運用開始予定）では配信遅れはあるものの観測間隔が短くなり、雲の発生や変化・消滅などの現象をより正確に把握可能となることから日射分布の推定精度の向上が期待できる。

(5) 空間補完

気象衛星ひまわりの観測画像から推定した日射パターンを用いて日射計測値を空間補完することにより四国エリアの日射分布を推定する手法を図 11 に示す。

緑色の四角を日射計測値のあるメッシュとし、この値を用いて赤色のメッシュ（ひまわり推定日射のみ）を補完する。日射計測値のあるメッシュについては日射計測値を採用することとすると、ひまわり推定値を日射計測値に一致させるために必要な調整量（ α_n ）が求まる。この α_n を距離 D_n に反比例させて加重平均することで補完対象メッシュの調整量を求めて補正することで日射計測値の空間補間を行っている。

なお、 β は日射計測値のあるメッシュと補完対象のメッシュの距離が調整量に及ぼす影響度合を与える係数である。

(6) 日射量の推定精度

各種の補正を行った場合の推定日射の精度評価の一例を図 12 に示す。四国地内の 15 か所の日射計測値について、1 地点ずつ除外して推定計算を行い、推定計算に用いなかった地点の推定精度を評価する交差検証を行っている。四国全体の値は、

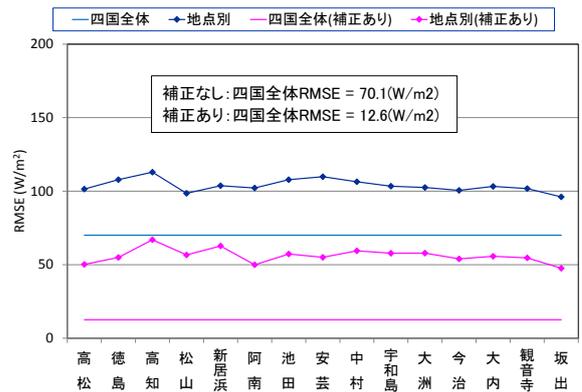


図 12 日射推定精度の評価

地点毎の推定値を PV の設備容量で加重平均したものである。

地点毎の誤差 (RMSE) は補正を行わない場合には 100(W/m²) 以上あるが、補正を行うことで 60(W/m²) 程度まで低減できていることが分かる。また、四国全体の RMSE は補正を行わない場合の約 70(W/m²) に対して補正を行った場合十数 (W/m²) と良好な推定精度が確保できていることが分かる。

3.2 PV 出力への変換^{17)~20)}

PV パネルは設置状況（傾斜角、方位角、架台等）や出力効率、温度特性などが様々であり、全てを正確に把握することはできない。

そこで、本推定システムでは高压連系、低压連系（10kW 以上）、低压連系（10kW 未満）の 3 通りの連系区分に分類し、連系区分ごとに定数等を設定して発電出力に変換することとした。

なお、各々の定数については文献等を参考に仮設定を行い、推定精度の評価検証を踏まえ調整を行った。

このようにして求めた連系区分別の 5km メッシュの PV 出力を集計することにより四国トータルの PV 出力を計算するほか、必要に応じて県別等の値を把握することも可能である（図 13）。

(1) 全量出力の換算

PV パネルの傾斜角を 10,20,30 度、方位角を東、南、西に分類し、これらの組み合わせ 9 パターンについて設置割合を設定した。

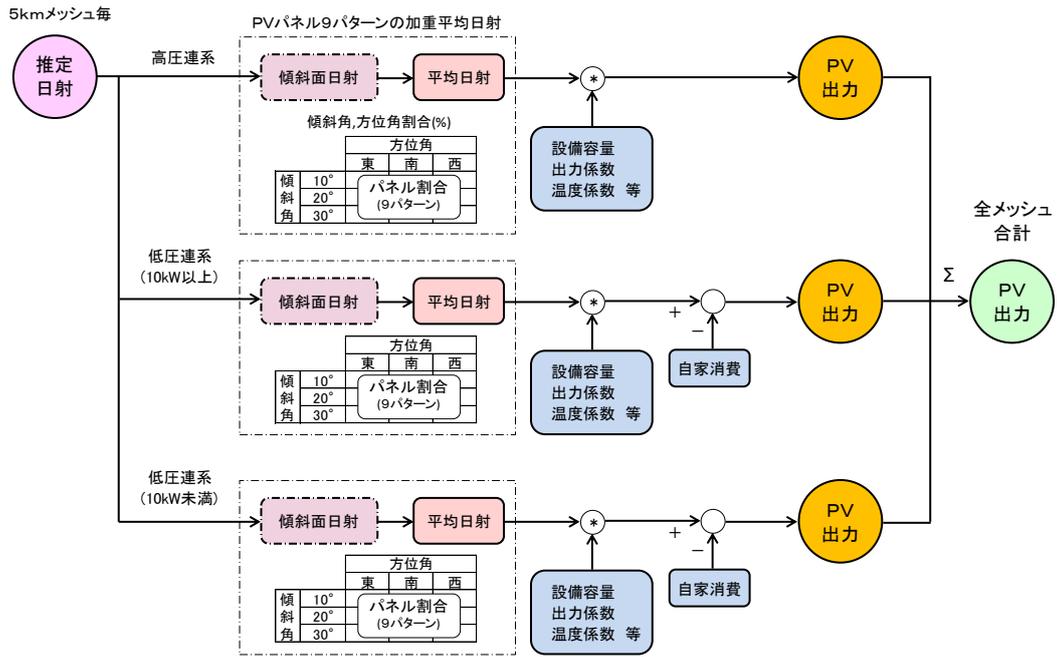


図 13 日射量から PV 出力への変換

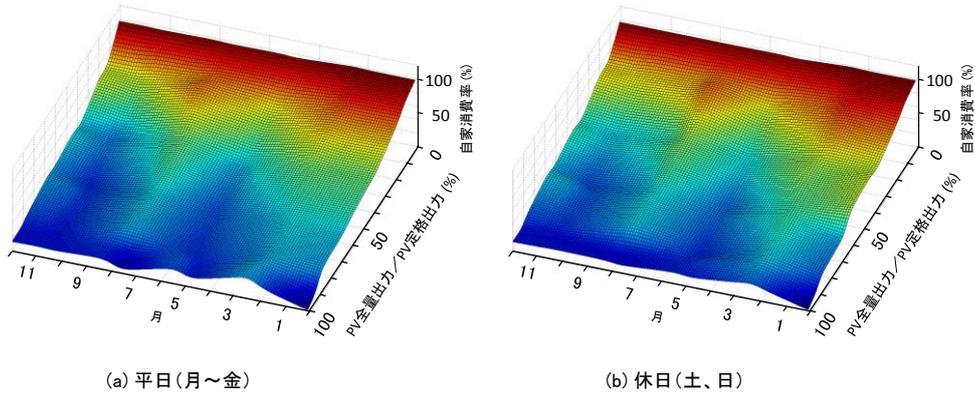


図 14 自家消費モデル (低圧 10kW 未満)

推定日射は水平面の値であるので、設定した割合で PV パネルが設置されているとした場合の平均日射を 5km メッシュごとに計算する。これに設備容量や出力係数をかけるとともに、気象庁 GPV の気温、風速等を使って推定した PV パネルの温度に基づき出力を補正することで、PV の総発電量を計算する。

(2) 自家消費の推定

固定価格買取制度(FIT)では住宅等小規模 PV は余剰買取、他は全量買取が基本とされている

ることから、低圧連系(10kW 未満)については、ロードサーベイデータ(H23~H25 年度、四国地内 21 件)を基に平日・休日別の自家消費モデルを作成し(図 14)、PV の全量出力に応じた自家消費量を計算する。

また、低圧連系(10kW 以上)については FIT 以前の余剰買取が残置していることなどを考慮し、推定結果と実績値の対比からシステム運開時点で数%程度の自家消費率を見込んだ。以降、PV の設備容量の増加に合わせて調整を行っている。

高圧連系については自家消費なしとした。

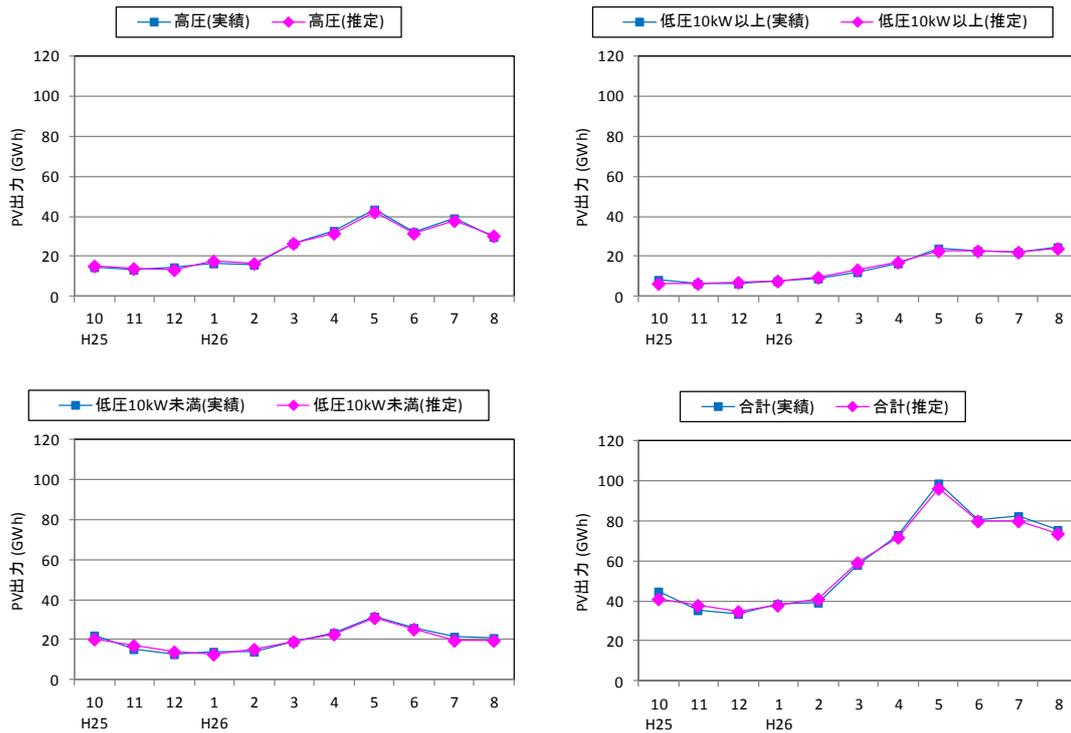


図 15 PV 出力実績推定精度の評価

(3) PV 出力の推定精度

日射量の推定精度については 3.1-(6) で述べたように日射計測値を使った交差検証により評価を実施した。しかし、日射量から PV 出力への変換結果については十分な数の実績値がないことから、

- ・ PV の購入電力量 (月量) による評価
- ・ PV 出力を反映させたロードカーブ波形の検証
- ・ PV 出力と AFC 発電機等の応動の検証

などにより評価・検証を行っている。

このうち定量的評価が可能な PV の購入電力量による推定精度の評価の一例を図 15 に示す。平成 25 年 10 月から平成 26 年 9 月までの 1 年間の推定誤差は、高圧連系が 0.6%、低圧連系(10kW 以上)が 1.9%、低圧(10kW 未満)が 1.1%、全体で 1.1%であり、良好な精度で推定できていることが確認できた。

5. まとめ

平成 26 年 10 月に実運用を開始した PV 出力実績推定システムの概要を紹介した。

今後、日射計測値を用いた各種補正手法の高度化や平成 27 年夏ごろに運用開始を予定している

気象衛星ひまわり 8 号の観測データ活用など、さらなる推定精度の向上について研究を行う予定である。

【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：“全天雲画像を用いた太陽光発電出力推定の一検討”，電気学会電力・エネルギー部門大会，156（2010）
- 2) 瀧川，岩部：“雲画像を用いた太陽光発電出力実績推定の一検討”，電気学会全国大会，6-021（2011）
- 3) 瀧川，岩部：“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）
- 4) 瀧川，岩部：“雲画像を用いた日射強度分布の実績把握に関する一検討”，電気関係学会四国支部連合大会，3-5（2011）

- 5) 岩部, 瀧川: "2 地点の雲画像を用いた広域日射量推定手法の一検討", 電気関係学会四国支部連合大会, 3-6 (2011)
- 6) 瀧川, 岩部, 安野: "雲画像を用いた日射強度分布推定の一検討", 電気学会研究会, FTE-11-030, MES-11-016 (2011)
- 7) K. Takigawa, K. Iwabu, T. Yasuno: "Estimation of Solar Radiation Distribution using Cloud Images", International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal, pp37-40 (2012)
- 8) K. Iwabu, K. Takigawa, T. Yasuno: "Specifying Method of Cloud Area Affecting Solar Radiation on the Ground Using Cloud", International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal, pp41-44 (2012)
- 9) 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)
- 10) K. Takigawa, K. Iwabu, T. Yasuno: "Visualization of Solar Radiation Distribution using Cloud Images", The International Conference on Electrical Engineering, pp.1384-1389 (2012)
- 11) 瀧川: "WEB カメラを用いた日射強度推定手法に関する検討", 電気学会電力・エネルギー部門大会, 171 (2012)
- 12) 瀧川: "WEB カメラを用いた日射強度分布の測定について", 電気学会全国大会, 6-127 (2013)
- 13) 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)
- 14) 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)
- 15) 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)
- 16) 瀧川: "TCT 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)
- 17) JIS: "太陽光発電システムの発電電力量推定方法", C8907 (2005)
- 18) 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)
- 19) 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)
- 20) NEDO: "太陽光発電システム共通基盤技術研究開発報告書" (2007)