

太陽光発電の発電量予測技術

Photovoltaic Power Generation Forecasting Technology for Supporting Energy Management Systems

石橋 直人 ISHIBASHI Naoto

飯坂 達也 IIZAKA Tatsuya

勝野 徹 KATSUNO Tohru

低炭素社会の実現に向けて、太陽光発電の導入が世界的に推進されている。太陽光発電は、発電量が気象条件により大きく変動するため、大量に導入されると電力系統に悪影響を与える。このため、発電量を予測し、需給制御を行う必要がある。富士電機は、安定した需給制御を実現するために、発電量予測技術を開発した。数値気象予報データから日射量を予測し、太陽光モジュールの特性を用いて発電量に換算することで、世界のどの地域においても数日先までの予測が可能である。

With the aim of realizing a low-carbon society, photovoltaic power generation is being promoted worldwide. The amount of photovoltaic power generation will fluctuate dramatically according to the weather conditions, and may adversely affect the power system if introduced in large quantities. Therefore, it is necessary to forecast the amount of power generation and to control the supply and demand. In order to achieve supply and demand control that is stable, Fuji Electric has developed technology for forecasting the amount of power generation. By predicting the amount of insolation from numerical weather forecast data, and converting that prediction into an amount of power generation based on the properties of photovoltaic modules, the amount of power generation can be forecasted for up to several days in the future in any region of the world.

1 まえがき

近年、低炭素社会に向けた取組みや東日本大震災後の電力不足を背景に、電力系統に太陽光発電を大量に導入することが計画されている。しかし、太陽光発電は、気象条件に依存して発電量が大きく変動するため、電力系統に悪影響を与えることが懸念される。このため、電力系統の安定的な需給制御を行うには太陽光発電の発電量を予測し、エネルギーマネジメントシステム (EMS: Energy Management System) ⁽¹⁾ で発電機や蓄電池の計画や制御を行うことが重要である。

本稿では、開発した発電量予測手法とシミュレーションによる有効性の確認結果について述べる。

2 発電量予測技術の概要

太陽光発電における予測方式としては、発電量を直接予測する直接予測と、日射量を予測してから発電量に換算する間接予測の二つがある。直接予測は太陽光発電モジュールごとに発電量とさまざまな要因との関係をモデル化する必要がある。

一方、間接予測は、近年では汎用的に予測できる方式として主流となっている。この方式では、気象情報と日射量との関係をモデル化する必要があり、利用する気象情報により次の三つの方法に分類することができる。⁽²⁾

(1) 天気予報利用方法

晴れ、曇りなどの天気から発電量を予測する。天気予報は離散的な予報しかできないため、高い予測精度が望めない欠点がある。

(2) 数値気象予報データ利用方法^{(4), (5), (6)}

気象庁では、地球水平面を数 km 間隔で地上数十層に格

子状に分割し、詳細な数値気象予報データを計算している。これを用いて発電量を予測する方法である。多くの気象要素を利用して予測することが可能であり、高い予測精度が期待できるメリットがある。一方、多くの気象要素を適切に処理する必要があり高い統計処理技術が要求される。

(3) 気象数値シミュレーション利用方法⁽⁷⁾

数値気象予報データを初期値にして計算の格子間隔をさらに細かく計算する方法である。分単位など詳細な予測ができる利点があるが、膨大な計算コストが必要になる欠点がある。⁽⁸⁾ 計算条件にもよるが計算時間が2~20時間との報告もあり、EMSの計算更新周期30分に収まらない。

EMSでは、需給バランスを制御する必要があるため、太陽光発電予測には、高い精度と早い計算が要求される。また富士電機では高い統計処理技術を保有していることから、(2)の数値気象予報データを利用した太陽光発電予測機能の開発を行った。

図1に、発電量予測システムの機能構成を示す。気象庁から発表される数値気象予報データを受信し、予測対象地域の気象予報を抽出する。これらの気象予報には日射量が含まれていない。そのため、発電量予測システムは、気象予報値から日射量を予測し、最後に予測対象地域にある太陽光発電モジュールの特性を用いて発電量に変換する。⁽⁹⁾

本システムの特徴を次に示す。

- (a) 世界中のどの地域でも、適用可能である。
- (b) 最大192時間先までの予測が可能である。
- (c) 多くの気象要素を用いているため、精度の高い発電量予測が可能である。
- (d) 計算時間が1分以内とEMSの計算更新周期30分よりも早く、システムへの負荷が小さい。

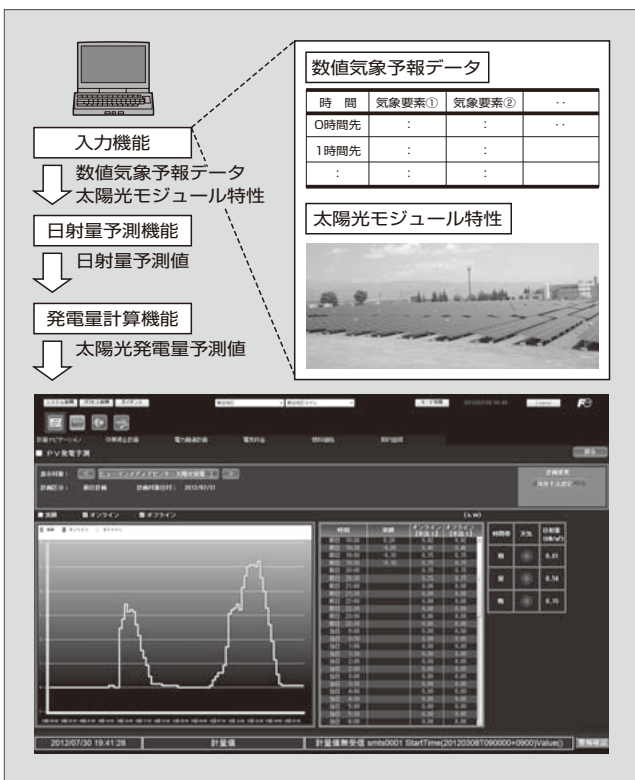


図1 発電量予測システムの機能構成

3 発電量予測手法

3.1 数値気象予報

数値気象予報では、大気を数 km 間隔の三次元格子網で覆い、格子点上の大気（気温、風速、風向、気圧）や水蒸気（相対湿度、降水量、雲量）などの気象要素の時間変化を数値的に解くため、膨大な観測データと計算能力が必要である。そのため、主要国の気象庁でのみ実施されている。日本の気象庁では GSM（全球域）、GSM（日本域）、MSM（日本域）の三種類を計算している。表1に示すように、予報範囲、格子間隔、配信間隔、予報期間が異なる。数値気象予報ではさまざまな気象要素が予報されているが、発電量予測に必要な日射量については予報されていない。

なお、開発した発電量予測手法は、三種類の数値気象予報データのいずれも利用可能である。

表1 数値気象予報の予報内容

予報種別	予報範囲	格子間隔	配信間隔	最大予報期間
GSM (全球域)	全世界	東西0.5° 南北0.5° 鉛直17層	6時間	192時間
GSM (日本域)	北緯20°～50° 東経120°～150°	東西0.25° 南北0.2° 鉛直17層	6時間	192時間
MSM (日本域)	北緯22.4°～47.6° 東経120°～150°	東西0.05° 南北0.0625° 鉛直16層	3時間	33時間

3.2 日射量予測方法

地上における日射量は、太陽からの日射量が大气において減衰したものである。この物理的な特性を考慮して日射量を予測するため、図2に示すとおり、(1)～(3)の三つのステップで計算を行った。

(1) 大気外日射量の算出

大気外日射量は、大気圏に入る前の太陽放射エネルギー量のことであり、次式に示すように位置と太陽の方位から算出することができる⁽¹⁰⁾。

$$H_0 = I_0 \sin(h) \dots\dots\dots(1)$$

$$\sin(h) = \sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega) \dots\dots\dots(2)$$

$$(\sin(h) < 0 \text{ のとき } \sin(h) = 0)$$

H_0 : 大気外日射量

I_0 : 太陽定数

h : 太陽高度

δ : 赤緯

ϕ : 緯度

ω : 時角

(2) 地上日射量予測モデルの構築

大気における大気外日射量の減衰は、大気中の湿度や雲量など多くの気象要素から影響を受ける。そのため、地上における日射量を精度高く予測するためにはこれら多くの要素を用いて予測することが望ましい⁽⁶⁾。

表2に、予測に用いる入出力データを示す。従来から予測モデルとして最も多く使われている手法は重回帰式であるが、重回帰式では多重共線性の問題によって、予測精度が悪化することがある。多重共線性とは、入力データの相互に強い相関関係が生じたとき、適切なモデルを構築できなくなる現象のことである。表2に示すとおり多くの入力データがあると、多重共線性の問題が発生する場合があります。重回帰式では適切な予測モデルができないことがあった。そこで、部分的最小二乗法（PLS：Partial Least Squares）と呼ばれる統計手法を用いてモデル化した。PLSでは説明変数間の多重共線性を扱うことができ、

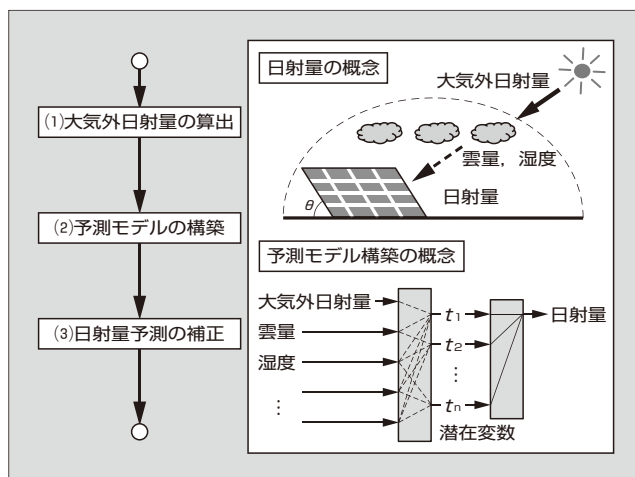


図2 日射量予測のフローチャート

表2 日射量予測モデルの入出力情報

入出力	大項目	詳細項目
入 力	雲 量	全雲量 雲量 (上層) 雲量 (中層) 雲量 (下層)
	湿 度	1,000 hPa面湿度 925 hPa面湿度 850 hPa面湿度 700 hPa面湿度 600 hPa面湿度 500 hPa面湿度 400 hPa面湿度 300 hPa面湿度
	日射量	大気外日射量
出 力	日射量	日射量

安定した回帰係数を求めることができるという利点がある。PLS では多重共線性を扱うために、説明変数を潜在変数と呼ばれる中間変数に集約した上で、出力変数を次式に示すように表現する。

$$t = (W^T P_C)^{-1} W^T x \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$y = Q_C t = Q_C (W^T P_C)^{-1} W^T x \quad \dots\dots\dots(4)$$

- x : 入力変数
- t : 潜在変数
- y : 出力変数推定値
- W : 重み行列
- P_C : 入力変数に関する係数行列
- Q_C : 出力変数に関する係数行列

(3) 地上日射量予測の補正

(2)で求めた地上日射量の予測値は、モデル構築に用いたデータのばらつきなどの影響により、わずかであるが物理的な値を逸脱する場合がある。そこで、日射量予測値が物理的に取り得る範囲を逸脱する場合は、最大日射量もしくは最小日射量に補正する。また、雨天のとき日射量は最小日射量になるため、予報降水量から雨天時と判断される場合は、最小日射量に補正する。

3.3 発電量予測方法

発電量は、次式によって日射量と太陽光パネルの効率から求めることができる。

$$P_{out} = y P_{rate} E_{trans} E_{temp} \quad \dots\dots\dots(5)$$

- P_{out} : 発電量
- y : 日射量
- P_{rate} : 定格出力
- E_{trans} : 変換効率
- E_{temp} : 各温度におけるモジュールの変換効率の係数 (モジュール温度効率)

しかし、図3に示すように太陽光パネルのモジュール温度効率は、太陽光パネルの種類により効率の変化の度合いが異なる特徴がある。そこで、モジュール温度効率をテーブルとして持つことで、さまざまな太陽光パネルに対応できるようにした。

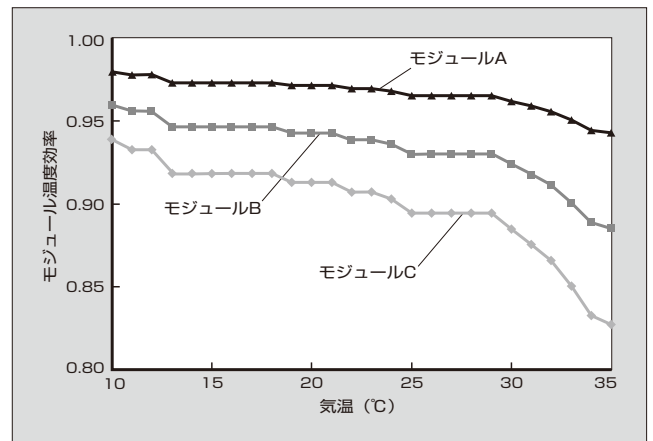


図3 気温とモジュール温度効率の関係

4 シミュレーション例

開発した発電量予測手法に基づきシミュレーションを行った。図4に日射量の予測と実績の比較を、図5に太陽光発電量予測と実績の比較結果を示す。数値気象予報データは、日の出前の3時発表のGSM (日本域)を用い、4時から翌日3時まで24時間分の予測を行った。評価月は、4月と7月のそれぞれ1か月間である。

解析結果は、おおむね良好な予測結果であった。一部で予測と実績の乖離(かいり)が生じているが、これは配信された数値気象予報自体の誤差によるものであることが分かっている。また、太陽光発電予測の予測精度を表3に示す。太陽光発電予測に求められる予測精度は、発電機の起動停止に悪影響を与えないためには発電機1台分以下である。EMSの制御対象発電機を10台(大規模離島での発電機数)、太陽光発電が系統容量の30%(国内の2030年導入目標)とすると、求められる太陽光発電予測の精度は太陽光発電量の定格が1.0p.u.ならば0.33p.u.(発電機1台分の定格容量)以下となる。表3から全ての

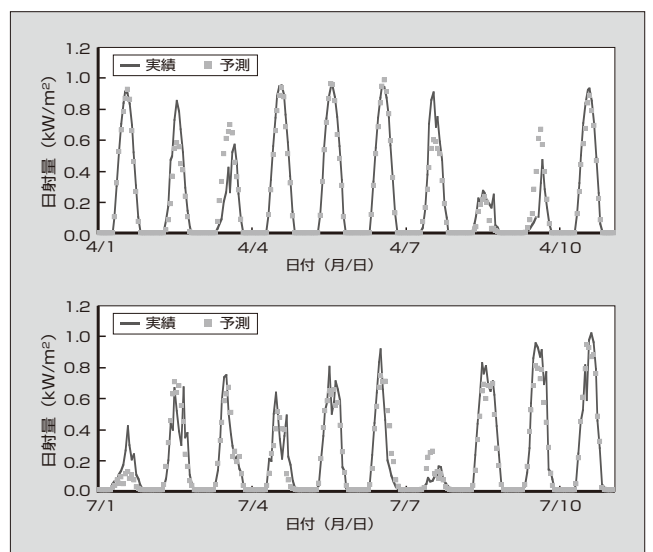


図4 日射量予測結果

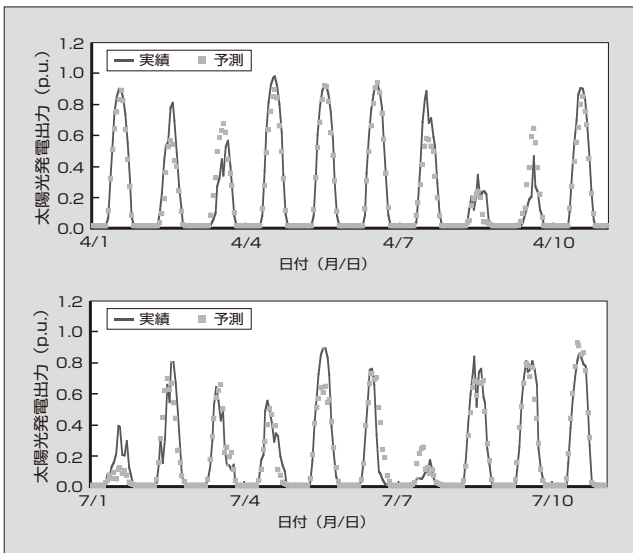


図5 太陽光発電の発電量予測結果

表3 太陽光発電予測精度

算出方法	6時	7時	8時	9時	10時	11時	12時
RMSE (p.u.)	0.01	0.04	0.07	0.12	0.15	0.18	0.20
MAE (p.u.)	0.01	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15	0.15
算出方法	13時	14時	15時	16時	17時	18時	平均
RMSE (p.u.)	0.18	0.16	0.16	0.12	0.08	0.04	0.12
MAE (p.u.)	0.14	0.12	0.12	0.09	0.06	0.03	0.09

RMSE : Root Mean Square Error
 MAE : Mean Absolute Error
 p.u. : per unit法 (単位法)

時刻において、0.2 p.u. 以下での予測が可能であり、本手法が有効であることが分かる。

5 あとがき

EMSにおいて発電機の起動停止計画を立案する上で欠かせない太陽光発電の予測技術について述べた。本技術は、数値気象予報で配信される雲量や湿度など多くの気象予報を用いて予測するため、予測精度が高いという利点がある。また、数値気象予報は地球全体を予測していることから、世界中いずれの地域でも適用可能な方法である。

この技術は、風力発電の発電量予測技術とともに、再生可能エネルギーの予測技術として、“北九州スマートコミュニティ創造事業”において実証試験中である。今後、予測精度の向上や予測対象時間の拡大などの改良を行っていく所存である。

参考文献

- (1) 荻本和彦. 太陽光発電と電力システム. 電子情報通信学会誌. 2010, vol.193, no.3, p.217-221.
- (2) 大関崇ほか. 太陽光発電の発電予測の現状と課題. メタボリズム社会・環境システム研究会. 2011, MES-11-004.
- (3) 工藤満ほか. エネルギーネットワークにおける太陽光発電予測技術. 電気学会B部門論文誌. 2007, vol.127, no.7, p.847-853.
- (4) 片岡裕次郎ほか. 雲量の数値気象予報データを用いた日射量予測. 太陽・風力エネルギー講演論文集. 2009, p.127-130.
- (5) 山岸良雄ほか. 北陸地域における日射量の基礎検討. 電気学会全国大会. 2010, no.6-076.
- (6) 大平涼子ほか. 部分的最小二乗法を用いた日射量予測. 電気学会全国大会. 2012, no.6-021.
- (7) 高山聡ほか. 予測誤差傾向を考慮した大規模太陽光発電所の計画運転. 電気学会B部門論文誌. 2011, vol.131, no.3, p.64-71.
- (8) 風力発電電力系統安定化等技術開発—気象予測システム—気象予測に基づく風力発電量予測システムの開発. NEDO報告書. 2008, p.425-429.
- (9) 石橋直人ほか. 部分的最小二乗法を用いた日射量予測とその信頼区間の推定方法. 電気学会B部門論文誌. 2013, vol.133, no.1, p.304-312.
- (10) 日本太陽エネルギー学会編. 新太陽エネルギーハンドブック. 第4刷, 日本太陽エネルギー学会. 2000, 841p.
- (11) 加納学. プロセスケモメトリクスによる統計的プロセス管理. システム/制御/情報. 2004, vol.48, no.5, p.165-170.



石橋 直人

電力・エネルギー分野のインテリジェントシステムの適用研究・システム開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所制御技術開発センタースマートグリッド開発部。電気学会会員。



飯坂 達也

電力・エネルギー分野のインテリジェントシステムの適用研究・システム開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所制御技術開発センタースマートグリッド開発部マネージャー。博士(工学)。電気学会会員。



勝野 徹

電力・エネルギー分野の解析・制御アルゴリズム開発業務に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所制御技術開発センタースマートグリッド開発部長。電気学会会員、日本シミュレーション学会会員。



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。