集

# 大規模太陽光発電所の発電性能モデリング技術

Technology for Modeling Power Generation Performance of Large-Scale Grid-Connected Photovoltaic Plants

長坂 真理 佐藤 誠 中村 浩

NAGASAKA Mari

■ SATO Makoto

■NAKAMURA Hiroshi

近年,全国各地でメガソーラーシステムと呼ばれる大規模な太陽光発電所の建設が進んでいる。多くの発電所には,気象センサや発電量センサのデータを可視化して発電状況を把握する機能が搭載されているが,気象条件によって発電量が大きく左右されるため,大規模化に伴い,可視化による発電所の異常の把握が困難になりつつある。そこで,気象条件を考慮した太陽光発電性能の監視技術が重要となる。

東芝は、大規模太陽光発電所を対象とした発電性能モデリング技術を開発した。この技術は、所内の発電損失を考慮しながら発電所ごとの特性パラメータは必要としない、多段階の多変量多項式回帰モデルを活用したもので、大規模太陽光発電所の発電データを用いて発電量の予測精度に対する有効性を評価した。現在、この技術を用いた発電性能分析システムにより、いくつかの大規模太陽光発電所の発電性能異常分析を実証中である。

A number of large-scale grid-connected photovoltaic (PV) plants have been constructed throughout Japan in recent years. In order to predict their power generation performance, which is affected by meteorological conditions, many PV plants have functions to visualize data from weather sensors and PV power generation sensors. With the upscaling of PV plants, however, it has become difficult to correctly grasp states of system abnormality by means of such visualization functions.

As a solution to this issue, Toshiba has developed a technology for modeling the power generation performance of large-scale grid-connected PV plants taking weather conditions into consideration. Applying a multivariate polynomial regression model, this technology can predict PV power generation output taking into account such factors as losses caused by various devices without being affected by the characteristic parameters of an individual plant, and is expected to contribute to more accurate predictions in this field. We have confirmed its effectiveness using actual PV plant data, and are now conducting verification tests of a PV power generation performance analysis system using this technology at several large-scale grid-connected PV plants.

## 1 まえがき

近年,全国各地でメガソーラーシステムと呼ばれる大規模な太陽光発電所の建設が進んでおり,多くのプラントで,気象センサや発電量センサのデータを可視化して,発電状況を管理者が監視する機能が搭載されている。しかし,大規模太陽光発電所では,設備の一部に異常があっても全体の性能への影響は少なく,日射量や気温など気象条件の変動が発電量を大きく左右するため,設備の異常が見過ごされてしまうという問題がある。そこで,気象条件を考慮した太陽光発電性能の監視技術が重要となる。

発電実績データを用いて気象センサから発電量を正確に予測するために、発電性能モデリング技術が利用される(1)-(4)。得られた性能モデルの予測と実績を比較することで、性能の低下を検出することができる。これまでの発電性能モデリング技術では、発電所ごとに異なる太陽電池モジュールの特性と日射のプロセスを考慮した物理式を用いてモデリングすることで、パワーコンディショナ (PCS)の入力となる直流 (DC) 出力を予測していたため、発電所ごとに特性パラメータを設定する必要があった。また、大規模太陽光発電所では、接続箱や集

電箱によって集約されたDC電力は、PCS、中間変圧器、及び連系変圧器を経て、高圧の交流(AC)電力として系統に出力される。またその間に、PCS冷却装置やシステム監視装置などの運転もあり、正確な予測のためには、日射プロセス以外にも様々な所内機器による損失プロセスを考慮して、系統への出力(以下、系統出力と呼ぶ)を予測することが必要となる。

そこで東芝は、所内の損失プロセスを考慮しながら、個々の発電所に依存した特性パラメータを必要としない、多変量多項式回帰による発電性能モデリング技術を開発した。この技術は、どのような大規模太陽光発電所でも、気象センサのデータから系統出力を同様の方式で簡易かつ正確に予測できるため、様々な大規模太陽光発電所において発電性能の低下を検出することが期待できる。当社が東京電力(株)に納入した川崎市の浮島太陽光発電所の発電データを用いて評価した。また、この太陽光発電性能モデリング技術を用いた異常の検出についても、シミュレーションによる精度の検討を行った。現在、この技術を用いた太陽光発電性能分析システムにより、いくつかの大規模太陽光発電所で分析を進めている。

ここでは、太陽光発電性能モデリング技術の概要と、それ を用いた大規模太陽光発電所の発電データ及び分析処理につ いて述べる。

# 2 大規模太陽光発電所の構成と発電状況

太陽光発電所では、複数枚の太陽電池モジュールが直並列に接続されたアレイで発電されるDC電力を、接続箱と集電箱によって集約し、PCSがAC電力へ変換する。そして、中間変圧器及び連系変圧器によって昇圧し、電力系統へ出力(逆潮流)する。多くの大規模太陽光発電所では、複数の計測点において様々なデータの計測が行われている(図1)。それらは、気象データである日射量と外気温、PCSの入力点におけるDC電力、PCSの出力点におけるAC電力、及び系統出力電力が主なものである。また、電力損失の要因としては、PCSにおけるDC-AC変換の損失(以下、PCS損失と呼ぶ)と、AC電力を発電プラント内で昇圧する際の損失、ケーブルによる損失、及び昇圧器やPCSの冷却用空調機による損失(以下、これらをAC設備損失と呼ぶ)、の2種類が挙げられる。

浮島太陽光発電所は、単結晶シリコン型198 Wの太陽電池 モジュール37,926 枚と250 kWのPCS 28台で構成される、容量 7,000 kWの大規模太陽光発電所である。浮島太陽光発電所の 発電データを集計したところ、PCS 損失は年間で約2.5~3.5%、 AC 設備損失は年間で約5%ということが確認された(図2) <sup>(5), (6)</sup>。

## 3 太陽光発電性能モデリング技術

当社は、大規模太陽光発電所の発電性能をモデル化するため、多変量多項式回帰を用いた電力系統の予測モデルを開発した。モデル変数として外気温から推定したモジュールの温度、日射量、及び計測点より上流の電力値を用い、2乗までの多項式の範囲で系統出力電力を予測する。モデルの選択は、説明変数の目的変数に対する寄与率に基づいて行った。また、計測点が複数存在することを利用して、気象センサから各計

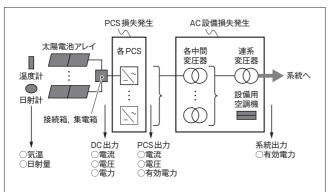


図1. 大規模太陽光発電所の設備構成例 — 大規模太陽光発電所は様々な設備によって構成される。浮島太陽光発電所では、複数の計測点で1秒ごとに気象データと電力データが計測されている。

Example of configuration of large-scale grid-connected PV plant

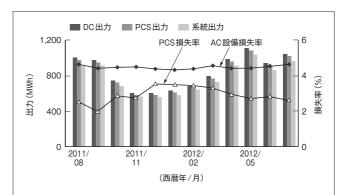
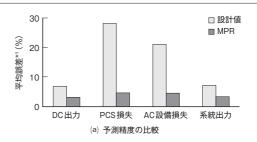


図2. 東京電力(株) 浮島太陽光発電所の発電量と損失の内訳 — PCSの入力と出力の間の損失は約3%, PCS出力と系統出力の間の損失は約5%であった。 Monthly power generation and power losses of Ukishima Solar Power Station of Tokyo Electric Power Co., Inc.

測点の電力を直接予測するのではなく, 発電プロセスと損失 プロセスをそれぞれ多変量多項式回帰モデルによって表現す る構成とした。

複数計測点の発電データから得られたそれぞれのプロセス におけるモデルの精度と、それらを組み合わせた系統出力の 精度を図3(a)に示す。また、比較のため、浮島太陽光発電所



太陽光発電性能モデリング技術	モデルの平均誤差*1(%)	
線形回帰 (I, V)	3.5	
MPR (I, V)	2.5	
MPR (P)	2.6	
Sandia (I, V)	2.6	
Energy ratio (I, V)	2.9	

(b) DC出力におけるモデルの平均誤差の比較

太陽光発電性能モデリング技術	モデルの平均誤差*2(%)	
	系統出力	PCS出力
1段階モデル	4.9	4.8
2段階モデル	3.9	3.9

(c) 1段階モデルと2段階モデルの平均誤差の比較

\*1: 浮島太陽光発電所2011年8月10日~2012年8月9日における 9時~16時の1時間平均値データを利用

\*2: 浮島太陽光発電所2011年8月10日~2012年8月9日における 6時~19時の1時間平均値データを利用

図3. 太陽光発電性能モデリング技術と予測精度 — JIS C 8907による 設計係数を利用した性能と損失の予測は、実際のデータと大きなかい離があった(a)。 DC 出力の予測では、もっともよい Sandia モデルと同程度であった(b)。ある計測点の電力を直接予測するよりも、出力と損失の2段階モデルを利用したほうが、より高い予測精度となった(c)。

PV power generation performance modeling methods and prediction accuracies

特

を設計する際に行った, JIS C 8907 (日本工業規格 C 8907) や各種機器のスペック情報に基づいた見積り方式の精度も示す。これらの結果から, 当初見積もっていた発電出力や損失と実際のデータには大きなかい離があり, 太陽光発電性能モデリングでそれらが修正できることがわかった。

図3(b)は、複数の太陽光発電性能モデリング技術によるDC出力の予測精度を示したものである。図3(a)では全てのDC出力の合計値をモデリングしていたが、ここでは、250 kWのPCS 28台それぞれに対してモデリングを行い、算出した予測精度の平均値を示している。Sandia法(1)、(3)やEnergy Ratio法(2)、(4)では浮島太陽光発電所の太陽電池モジュールの特性係数を設定したが、開発した多変量多項式回帰モデルMPR(Multivariate Polynomial Regression)では、そのような設備の仕様に関するパラメータを必要とせずに平均誤差は約2.5%と、他の手法と同程度の精度が得られていることがわかる。図においてMPR(P)はDC出力のうちDC電力を目的変数として多変量多項式回帰を行った場合であり、MPR(I, V)はDCの電流(I)と電圧(V)を目的変数とした二つのモデルを用いた場合を表している。

図3(c)は、ある計測点の出力電力を気象データから予測する際に、日射量と気温によって直接モデリングする技術(1段階モデル)と、発電出力を予測する発電モデル及び電力損失を予測する損失モデルをそれぞれ構築し、発電モデルの予測値から損失モデルの予測値を引くことで出力電力を予測する技術(2段階モデル)を比較したものである。

系統出力の1時間平均値予測では、1段階モデルの平均誤差が4.9%となった。一方、PCSからの出力(以下、PCS出力と呼ぶ)を対象とした発電モデルとAC設備損失を対象とした損失モデルによる2段階モデルでは、平均誤差が3.9%という結果が得られた。また、PCS出力の予測でも同程度の結果が得られている。ここで、数値はPCS 28台の平均値を表している。これらの結果により、複数の計測点を利用して発電モデルと損失モデルをそれぞれ回帰することで、発電出力をより精度良く予測できることが確認できた。

このように今回のデータからは、実際の大規模太陽光発電 所の発電性能分析では、設計時の性能予測方式ではなく発電 データから回帰したパラメータを利用することが重要であり、 多段階の多変量多項式回帰によって簡易かつ正確に性能モデ ルの構築を行うことができた、と結論づけられる。

#### 4 太陽光発電性能モデルによる異常検出

気象条件から太陽光発電の出力を予測する発電性能モデルを用いた性能異常の検出方法は、**図4**に示す2種類が考えられる。一つは、上の図のように、気象センサデータと発電データから太陽光発電性能モデルの逆関数を求めることで、性能

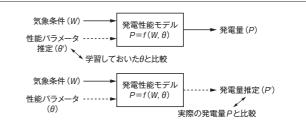


図4. 太陽光発電性能モデルを用いた発電性能異常の検出方法 — 発電性能モデルを利用した異常診断方式には2種類がある。

Process of detection of power generation performance abnormality using PV performance models

パラメータを明示的に推定する方法である(\*)。これは、電力計測が太陽電池モジュールに近い位置で行われ、太陽光発電性能が*IV*カーブなどで表すことができる場合に有効と考えられる。一方、下の図のように、太陽光発電性能モデルによる発電予測値と実際の発電データを比較することで、性能異常を検出する方法は広く利用されている。太陽光発電性能モデルの平均誤差が非常に小さければ、小さな性能異常でも早期に検出することが可能である。そこで、発電性能モデルの平均誤差と異常診断システムの検出性能(見逃し率)の関係を、統計的検定のシミュレーションによって調査した。

図5(a)は、性能モデリングを行った時点の性能値を100% とし、5%の性能低下が生じた場合を表している。太陽光発電 性能モデルの予測値と実測値から現在の推定性能値を算出し た場合、太陽光発電性能モデルの平均誤差の影響で、95%

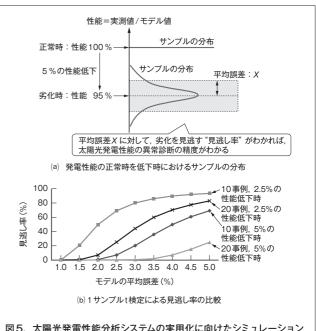


図5. 太陽光発電性能分析システムの実用化に向けたシミュレーション 一 発電性能モデルの発電量推定値と実際の発電量を比較する場合、モデル誤差が推定性能誤差につながる。そのため、1サンプルt検定を用いたときのモデルの平均誤差と性能低下見逃し率のシミュレーションを行った。

Simulation for practical application of PV power generation performance analysis system

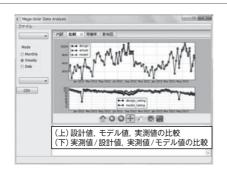


図6. 太陽光発電性能分析システム (プロトタイプ) の画面例 — 設計値, モデル値, 及び実測値の比較結果を表示している。

Example of prototype PV power generation performance analysis system display

を中心として平均誤差 Xの確率分布が得られることになる。このような独立事象がL個得られたとき,有意水準を1%とした1サンプルt検定の見逃し率をまとめたものが図5(b)である。この図では,モデルの平均誤差が $1\sim5$ %の範囲において,Lが独立な10事例と20事例の場合について,それぞれ2.5%と5%の性能低下が生じた場合の見逃し率を,それぞれ100万回のシミュレーションによって算出している。

図5(b)から、3章で得られた2段階のMPRの平均誤差が約3%の場合では、5%の性能低下が生じたときには、独立な20事例によって見逃しがほとんど生じない診断を、10事例によって約20%の見逃しの生じる診断を行うことが可能と試算された。また、独立な20事例で2.5%の性能低下を、例えば25%程度の見逃し率で検出するためには、モデルの平均誤差が2.5%となる必要があるなど、モデル精度の目標値が明らかになった。

図6は、これまで述べてきた太陽光発電性能モデリング技術を利用した発電性能分析システム(プロトタイプ)の画面である。このシステムには、図2のような複数計測点の間の損失比率を算出する内訳分析、設計パラメータを用いた発電予測値と発電実測値の比較分析、及び太陽光発電性能モデリング技術を用いたモデル予測値と発電実測値の比較分析機能を備えている。これにより、発電量と発電損失比率や太陽光発電性能の変化が確認できる。更に、PCSごとのダウンタイムや散布図による各種発電センサの相関分析機能も備えており、多角的に発電状況を把握することができる。現在、このプロトタイプシステムにより、6か所の大規模太陽光発電所の発電分析を行っており、異常診断機能の検証と改良を進めていく。

# 5 あとがき

気象センサから太陽光発電量を正確に予測する発電性能モデリングにおいて、個々の発電所に依存した特性パラメータを 必要としない、複数の多変量多項式回帰によるモデリング技 術を開発した。そして、この技術を浮島太陽光発電所の発電 データで評価し、既存技術と比較して有効性を確認した。ま た、太陽光発電性能モデリングを用いた異常診断の精度につ いて、シミュレーションによる検討を行った。

今後は、複数の大規模太陽光発電所において、この技術を 用いた太陽光発電性能異常分析システムの実証を進めていく。 また、発電性能モデルと機器信頼性モデルを組み合わせた設 備収益分析にも応用していく。

なお、この研究の一部は東京電力(株)との共同研究により 実施したものである。

# 文 献

- (1) King, D. et al. "Photovoltaic Array Performance Model". Sandia National Laboratories Report. 2004-08, SAND2004-3535. <a href="https://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2004/043535.pdf">http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2004/043535.pdf</a>, (参照 2014-06-03).
- (2) Kenny, R.P. et al. "Energy Rating of PV Modules: Comparison of Methods and Approach". Proceedings of the 3rd World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion. Osaka, 2003-05, IEEE. p.2015 - 2018.
- (3) Pratt, L. et al. "The Effect of Uncertainty in Modeling Coefficients Used to Predict Energy Production Using the Sandia Array Performance Model". IEEE Conference Publications. Honolulu, Hawaii, 2010-07, IEEE PVSC. 2010, p.2718 - 2723.
- (4) Barhdadi, A. et al. PVGIS Approach for Assessing the Performance of the First PV Grid-connected Power Plant in Morocco. The African Review of Physics. 7, 2012. <a href="http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1208/1208,4325.pdf">http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1208/1208,4325.pdf</a>, (營照 2014-06-03).
- (5) Nagasaka, M. et al. "Performance analysis and modeling results for a large-scale grid-connected photovoltaic plant". Proceedings of the 28th EU PVSEC. Paris, France, 2013-10, WIP Munich. EU PVSEC, 2013, p.4134 - 4138.
- (6) 長坂真理 他. "浮島太陽光発電所の発電データを用いた発電性能モデリング". 平成25年 電気学会全国大会講演論文集,第7分冊. 名古屋,2013-03,電気学会. p.81-82.
- (7) 佐藤 誠 他. 太陽電池モジュールの異常監視・診断システム. 東芝レビュー. 67, 1, 2012, p.18-21.



#### 長坂 真理 NAGASAKA Mari

研究開発センター システム技術ラボラトリー。 データマイニング及び応用統計分野の研究・開発に従事。 電気学会会員。

System Engineering Lab.



#### 佐藤 誠 SATO Makoto, D.Eng.

研究開発センター システム技術ラボラトリー主任研究員,博士 (工学)。データマイニング及び応用統計分野の研究・開発に 従事。情報処理学会,電気学会,米国統計学会(ASA)会員。 System Engineering Lab.



### 中村 浩 NAKAMURA Hiroshi

社会インフラシステム社 電力流通システム事業部 太陽光発電システム技術部主務。太陽光発電所向け遠隔監視システム の設計・開発に従事。

Transmission & Distribution Systems Div.