

特集 I

太陽光発電システムの大量導入とエネルギー・マネジメントの課題

PV 出力実績推定・予測システムの運用面からの要件と開発システムの特長について

Requirements and features of estimation and prediction system for PV output.

瀧川喜義*・菅 史夫*

1. はじめに

太陽光発電（PV）の導入が進んでおり、四国エリアにおいても H30 年 11 月末時点で 240 万 kW の PV が接続済みとなっており、契約申込済みのものを含めると 330 万 kW の導入量が見込まれている（図 1）。

四国エリアの需要は夏冬の重負荷期が 500 万 kW 程度、春秋の軽負荷期が約 200 万 kW 余りであり、供給量に対する PV の占める割合が非常に大きく、PV の増加に伴って電力の需給運用に与える影響が大きくなっている。

このような状況を踏まえ、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)～15)}。

ここでは、実際に本システムを使用している四国電力・中央給電指令所の運用面から求められる要件とシステムの特長について紹介する。

2. 太陽光発電出力予測システム

2. 1 システムの開発と現状

風力発電の出力予測システムの実用化に目処が立った 2009 年から四国電力と共同で各種先行研究等^{16)～20)}も参照しながら太陽光発電の出力予測システム（以下、PV 予測システム）の開発を行ってきた（表 1）。PV 予測システムは、四国エリアのトータルの PV 出力をリアルタイムに推定する実績推定システムと将来の PV 出力を予測する予測システムの 2 つで構成されている。このうち実績推定システムは 2014 年に、予測システムは 2015 年にそれぞれ四国電力の中央給電指令所において実績推定値・予測値の実運用を開始した。実運用開始当初はひまわり 7 号から 8 号への対応などいくつかの改良が予定されていたこともあり、四国総研に PV 予測システムを設置し、予測結果を四国電力に配信する形態を取っていた。これにより、ひまわり 8 号への対応や最新の研究成果、運用サイドからの要求等を迅速に実運用システムに反映することが可能であった。

その後、2017 年 4 月から四国電力に同一ロジッ

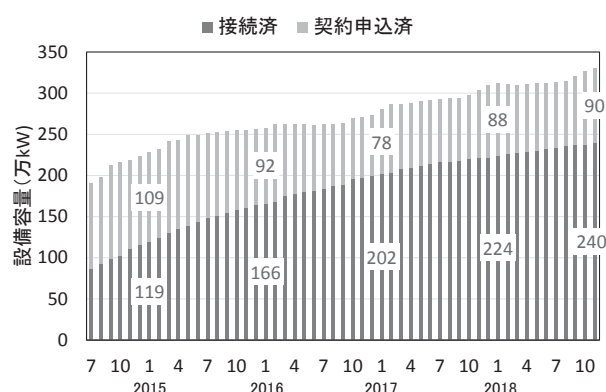
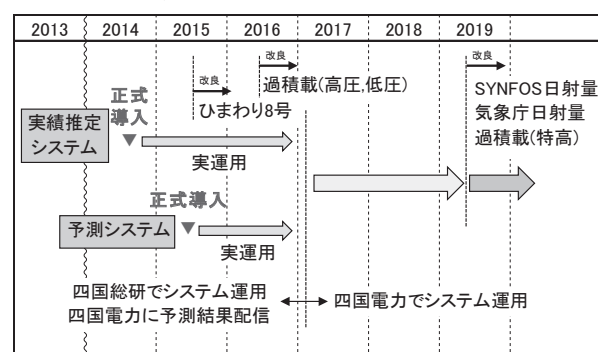


図 1 四国エリアにおける PV 設備の導入状況
(2018 年 11 月時点)

表 1 PV 予測システムの開発



* 株式会社四国総合研究所

クの予測システムを設置し、運用を行ってきたが、PV の出力制御の可能性がでてくるなど予測精度への要求が高まったこともあり、2019 年 4 月を目途に実運用システムにこれまでの研究成果を反映させるなど改良を加えることとした。既に改良版の予測システムが完成し、現在、最終の検証作業を行っている。

2014 年から 2015 年にかけて実運用を開始した PV 実績推定システムと PV 予測システムについては、既に詳細を公表している¹²⁾。ここでは、これ以降に改良を行ったひまわり 8 号への対応と今春から実運用システムで使用する日射量予報ベースの予測について概要を紹介する。

2.2 PV 出力実績推定システム

PV 出力実績推定システムは、四国エリアにおける現在の PV 出力を 1 分間隔で推定するシステムで、5km メッシュの日射分布を推定する前半部と日射分布から PV 出力に変換する後半部で構成されている (図 2)。

前半の日射分布を把握する手法としては日射計を用いる方法と衛星画像を用いる方法がある。日射計を用いる場合は日射計を設置している地点の日射量は正確に測定することができるが、日射計から離れた地点の日射量は限られた数の日射計測値から推定する必要があり精度が低下する。一方、衛星画像を用いる場合は地点ごとの推定日射量の精度は日射計測値に比べて劣るが、面的な日射分布を一定の精度で推定することができる。我々のシステムは個々の地点ではなく四国エリアトータルの PV 出力を求めるのが目的であることから、衛星画像を基本として用いることとした。

四国電力では他の計測値との整合を取るために 1

分毎の PV 出力を推定する必要がある。ひまわり 7 号は観測間隔が約 30 分～1 時間で、観測から配信までの遅れも長かったために、衛星画像の雲の移動のみを使って 1 分間隔の短周期変動まで正確に推定するのは困難であった。そこで、リアルタイムに収集している日射計測値を正とし、衛星画像から推定した日射パターンを用いて空間補間する方式をとっていた。一方、ひまわり 8 号は観測間隔が 2.5 分に短縮され、配信までの遅れ時間も短くなったことから、基本的に衛星画像から推定した日射量を用いることとし、日射計測値はその補正に用いるロジックに改めている。また、日射計測値は万が一衛星画像が途絶えた場合のバックアップとしての機能も有しており、日射計測値を空間補間することにより四国エリアの日射分布推定し PV 出力に変換することも可能である。

後半の日射分布から PV 出力への変換については 2015 年夏に高压と低压の PV について過積載への対応を行った¹³⁾ 以外に実運用開始当初から大きな変更はない。PV パネルの設置状況や自家消費の有無などを考慮するために低压 10kW 未満、低压 10kW 以上、高压に分けて PV 出力に変換している。あらかじめ設定しておいた PV パネルの傾斜角と方位角別の設置割合¹⁹⁾ をもとに水平面の推定日射を傾斜面日射に変換し、出力変換係数や温度補正係数、設備容量等をかけて PV の全量出力を求めている。低压 10kW 未満については自家消費モデルを用いて自家消費量を計算し、それを差し引くことで余剰電力に変換している。

PV の設備容量は実運用開始当初は FIT で登録された PCS 容量のみを使用していたが、過積載のシステムが増加したために PCS 容量とパネル容量の

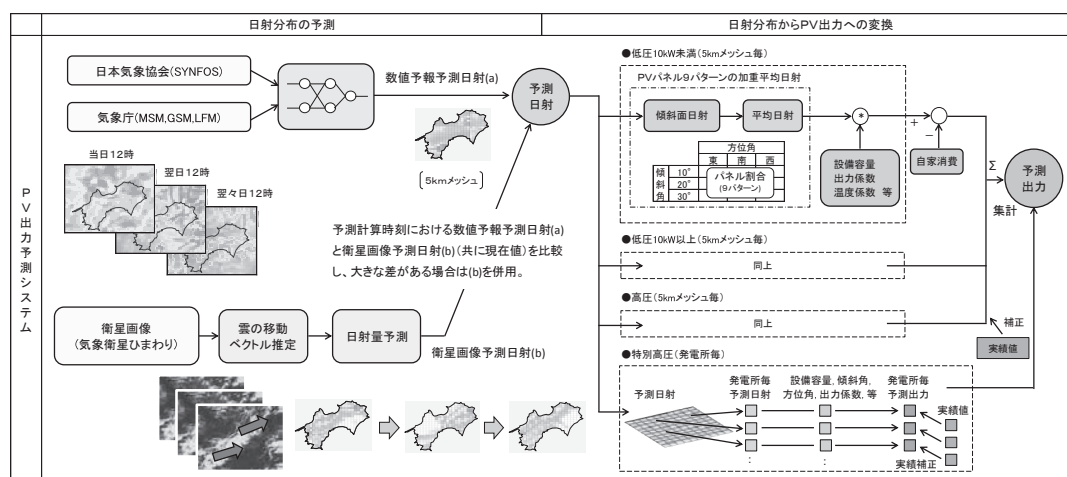


図2 PV 出力実績推定システムの概要^{1) ~ 15)}

両方をメッシュ毎に持たすことで過積載への対応を行った。特別高圧の過積載モデルについても今春更新するシステムで実装している。

このようにして求めた5km メッシュ毎のPV 出力を合計することにより四国エリアトータルのPV 出力を求めている。

2. 3 PV 出力予測システム

PV 出力予測システムは、将来のPV 出力を予測するシステムでPV 出力実績推定システムと同様に5km メッシュの日射分布を予測する前半部と日射分布からPV 出力に変換する後半部で構成されている(図3)。

前半の日射分布の予測については数値予報を基に8日先まで(PV 出力の予測計算は気象庁の数値予報に合わせて11日先まで行っているが、四国電力では8日先までを切り出して使用)の日射量を予測する数値予報予測日射と衛星画像から雲の移動を考慮して短時間先の日射量をより正確に予測する衛星画像予測日射を組み合わせることで予測精度の向上を図っている。基本的には数値予報予測日射を用いるが、予測計算時刻における数値予報予測日射と衛星画像予測日射(実績値に相当)を比較し、数値予報予測日射に大きな誤差がある場合は衛星画像予測日射に切り替えることで短時間先の予測精度を確保している。

数値予報予測日射については、実運用開始当初は気象庁の数値予報(MSM, GSM, LFM)の雲量(上層, 中層, 下層)を基に機械学習モデルを用いて地面の日射量に変換していたが、2017年12月から気象庁の数値予報に日射量の要素が追加された²¹⁾ことから、今春更新するシステムでは日本気象協会のSYNFOSの日射量予測値と気象庁の日射量予測値

を併用する方式を採用している。

後半の日射量からPV 出力への変換は低圧10kW未満, 低圧10kW以上, 高圧についてはPV 出力実績推定システムの場合と同じロジックを採用している。特別高圧(メガソーラ)については、数も限られており、ある程度の具体的定数が整定可能なことから発電所ごとにPV 出力に変換している。

最後に実績値(実績推定システムで求めた値もしくは特別高圧は計測値)を用いて予測値を補正することで短時間先の予測精度の向上を図っている。

2. 4 数値予報モデル変更に伴う予測精度

2017年2月から気象庁のMSM予測モデルがasucaに移行し²¹⁾、雲の特性が変化した。実運用中のシステムは機械学習モデルを用いて雲量から日射量への変換を行っているため、雲の特性に合わせて変換モデルを再チューニングする必要がある。

2017年12月～2018年8月における予測誤差(PV 出力の比較的大きな10時から14時の間の予測誤差を設備容量に対する割合で評価)を図4に△印で示す。*印は実運用開始前に2014年1月～2014年

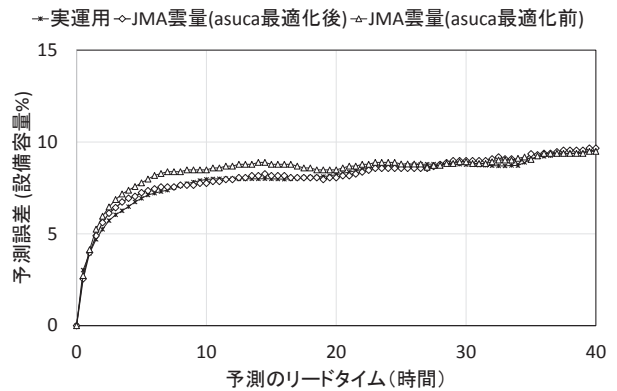


図4 気象庁の雲量予報ベースのPV 出力予測精度

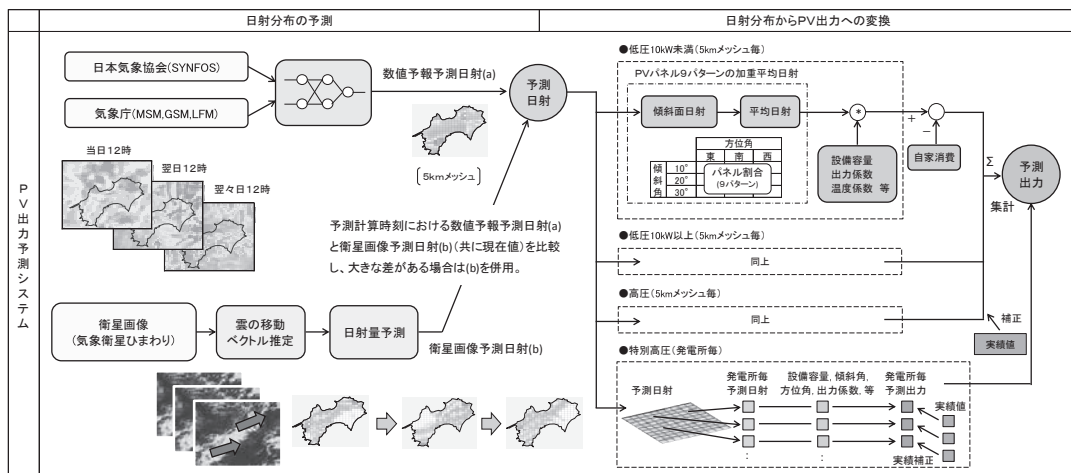


図3 PV 出力予測システムの概要^{1)～15)}

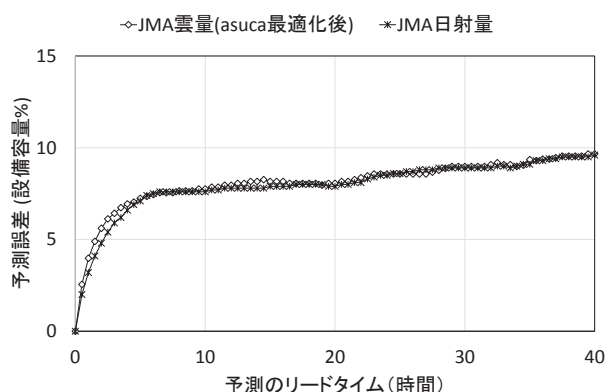


図5 気象庁の雲量と日射量ベースのPV出力予測精度

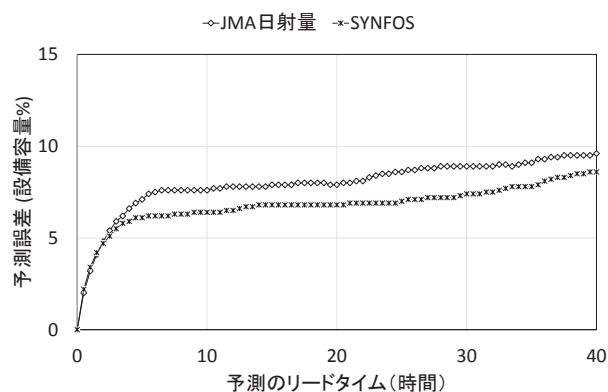


図6 気象庁日射量とSYNFOSS日射量ベースのPV出力予測精度

12月の値を評価したものである。雲量から日射量への変換モデルはいずれも現状の実運用システムと同じもの、即ち asuca に移行する前のデータでチューニングしたモデルとなっている。2017年12月～2018年8月の予測誤差は20数時間程度先までの時間帯で悪化している。試みに、asuca に変更になった後の雲量予測値を用いて雲量から日射量への変換モデルを再チューニングすると予測誤差は◇となり、従来の誤差特性とほぼ一致した。

2. 5 日射量予測値を用いた予測精度

2017年12月5日から気象庁の数値予報に日射量の要素が追加されたことから、2017年12月から2018年8月の期間について予測精度の比較を行った(図5)。◇印は気象庁の雲量予測値を用いて日射量に変換した場合で、雲量から日射量への変換モデルは asuca 移行後の雲量予測値を用いてチューニングしている。一方、*印は気象庁の日射量予測値をそのまま用いた場合である。5時間程度先までは日射量予測値を用いる方が予測誤差は小さくなっているが、長時間先になると日射量予測値を用いる場合と雲量予測値を用いる場合で大きな差はみられない。これは、短時間先は雲量から日射量への変換誤差が予測精度にある程度の影響を与えるのに対して、長時間先になると雲量から日射量への変換誤差よりも、そもそも雲が予報できているかどうかが重要となり、数値予報の精度自体が支配的となるために両者の違いが明確に現れなかったものと考えられる。このようなことから、今春更新するシステムでは、現在実運用に使用している雲量から日射量への変換モデルを asuca 用に置き換えるのではなく、日射量予測値を用いることとした。

同一条件で気象庁の日射量予測値を用いる場合と日本気象協会の SYNFOSS の日射量予測値を用いる場合のPV出力の予測誤差を評価した結果、

SYNFOSS の日射量予測値を用いる方が気象庁の日射量予測値を用いる場合に比べて予測誤差は小さくなった(図6)。これらの結果も考慮したうえで今春から気象庁の数値予報に加えて日本気象協会の SYNFOSS の数値予報を採用することとした。

3. 運用面からの要件

中央給電指令所(以下、中給)では、時々刻々と変化する需要と供給を一致させ周波数の適正維持のための出力調整や送電線に流れる電力や電圧を調整することで電力の安定供給に努めている。また、先々の安定供給のための調整力確保のための検討なども行っている。中給のこれらの業務を適切にサポートすることが本システムに求められる要件となる。

3.1 PV実績推定について

PV実績推定が中給の業務にどのように活用されているかの一例を、まずは紹介する。

中給ではエリアの電力の安定供給を担っていることからエリア全体での電力需要を常に把握しておく必要がある。先に記載したように需要と供給は一致していることから、供給力の元であるエリア内の発電機の出力を合計することによりエリアの需要を把握できる。発電機は、従来の火力、原子力、水力に加え、風力やPVの出力についても同様に扱われる。従って、これらの発電機の出力合計を求めることにより、エリアの需要を提供できる。なお、連系線に流れる電力も考慮する必要がある。

エリア需要の情報については、これまでもロードカーブとして運用者に提供しており、1分程度の周期で情報更新を行っている。ほぼリアルタイムで更新されるロードカーブなどをもとに先行き負荷予測を行い、火力機の運転調整や揚水発電機の起動停止調整を行うなど、需給調整業務において非常に重要

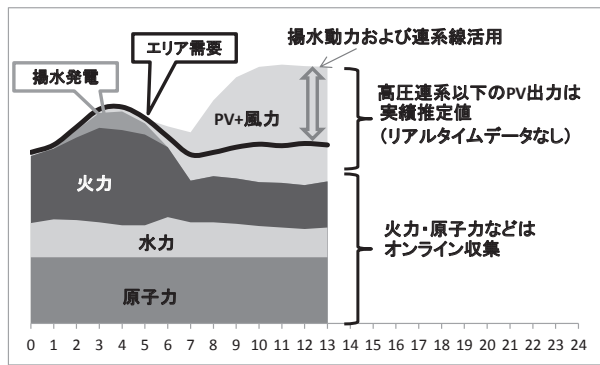


図7 ロードカーブの一例

な情報である。

時々刻々と変化するエリア需要を示すロードカーブ、ならびに発電機出力カーブのイメージを図7に示す。エリア需要については、各発電機の出力を合計することで求めているが、原子力、火力等PV以外の出力についてはほとんどオンライン収集しており、リアルタイム情報であることから高い精度の情報である。一方、PV出力については、メガソーラ発電所の出力はオンライン収集なので高い精度であるが、PV設備の9割程度を占める高圧連系以下の出力は推定値である。これまで同様、高い精度が求められるエリア需要にPV出力の割合が現在のように大きくなると（2018年GWでは80%以上となった日があった）、PV実績推定の精度がエリア需要の精度に大きく影響することとなる。

このようなことから、中給におけるロードカーブの重要性ならびにPV実績推定値の影響などを考慮し、PV実績推定システムに求められる要件としては、

- ✓ PV 実績推定値を1分周期で求められること
- ✓ PV 実績推定誤差をオンライン情報並みとすること

として、システム開発に取組んだ。

3.2 PV出力予測について

中給ではPV出力予測を活用し、ある決められた時刻までに行っている特徴的な業務があるので、その業務と予測の関係などを紹介する。

(1) 全面自由化時のPVに関する制度

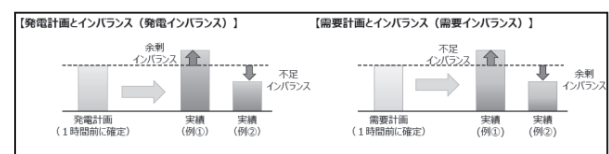
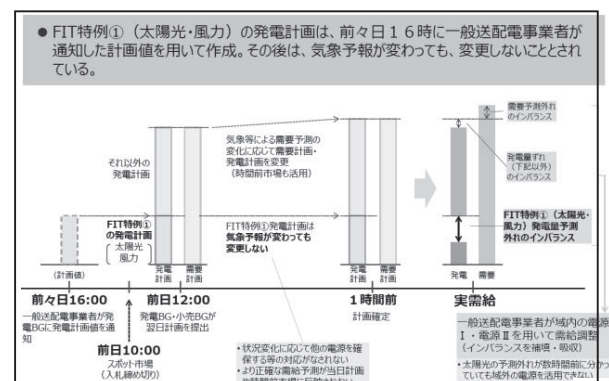
日本では、電力システム改革の中で小売部門の一部の自由化を進めてきたが、2016年4月家庭等の小口需要も含め全面的に自由化された。その際に様々な制度整備がなされたが、その一つとして計画値同時同量制度が導入された。これは、従来の需要量と発電量を一致させる「30分実同時同量」から

発電計画と発電実績、需要計画と需要実績のそれぞれを同時同量させるという計画値同時同量に移行するというものである（図8）。

これをFIT認定のPV電源に当てはめるとすると、PV発電の全量をFIT価格で処理する必要があるが、計画値同時同量制度においては計画発電量との差はインバランス価格で処理されることとなる。このFIT制度と同時同量制度の整合性を図るため、特例制度①、特例制度②が導入された。このうち、特例制度①の内容が中給のPV出力予測システムの要件に関係するので、こちらについて説明する。

特例制度①では、小売電気事業者と特定契約を締結したPV発電グループについての発電計画を一般送配電事業者である中給が設定することとし、設定された発電計画と発電実績は発電の特性上必ず差分が生じるが、その差分の精算に回避可能費用を適用しインバランス料金の精算には小売電気事業者にリスクが生じないように仕組みとした。すなわち、小売電気事業者は中給が設定した発電計画通りの電気を受電するとみなせる仕組みとした。

また、小売電気事業者へのPV発電計画の中給からの通知は前々日の16時までに行うこととなっている。さらに、前々日に通知したPV発電計画は気象予報が変わりPV発電予想が変わることであっても変更することなく最終計画（当日1時間前）とすることとなった（図9）。従って、小売電気事業者では前々日に受領したPV発電計画は確定したもの

図8 計画値同時同量でのインバランス
（電力・ガス取引監視等委員会資料）図9 FIT特例①の発電予測のタイミング
（電力・ガス取引監視等委員会資料）

として、翌日の発電計画、需要計画などを策定できることとなる。

現在、エリア内で大量に連系している PV 電源のうち FIT 特例制度①の割合は、2017 年 10 月末時点で、四国内では 97% 以上でありほとんどがこれに分類される（ほかのエリアについても同様の状況である）。しかも、四国内の需要に占める PV 発電量の割合は、需要の少ない時には 80% にも達したこともあるなど、相当大きくなる。

先に説明したように、小売電気事業者では前々日に受領した PV 発電予想がそのまま最終計画となることで発電、需要計画を作成するが、中給では実需給に合わせ各種発電機を運転調整しており、PV 発電予想の外れが大きなインバランス発生要因となっている。このため、中給では実需給に対応するための調整確保量が増加するなど需給調整の運用面での負担が増加している。また、インバランス調整のための調整力コストの回収が不十分となっているために、インバランス収支が悪化していることが報告されている。

これらの対策のため、特例制度①の運用見直しやインバランス料金制度の見直しの検討が経済産業省のもとで行われているが、その中でも、PV 出力予測の高度化に向けた技術開発の積極的な取り組みも紹介されている。このように、今後も PV 設備の連系量が増加することを考慮すると、PV 出力予測精度の向上がますます重要になってくる。

(2) PV の出力抑制と出力予測について

これまでも述べたように、中給では時々刻々変化する需要と供給を合わすことで電力の安定供給に努めている。供給力の中には天候により変動する PV 発電も含まれるが、PV 設備の導入がさらに進んでも、中給では需要と供給のバランスが崩れることのないよう、火力機や水力機の調整をあらかじめ行っておく必要がある。

PV を含めた再生可能エネルギー（以下、再エネ）の出力が大きく、PV 発電を含めた供給力が需要を上回ることが予想される場合には、火力電源などの出力抑制、揚水発電機の揚水運転、連系線を活用したエリア外への送電といった様々な対策を「優先給電ルール」に則り行い、電力の安定供給をはかることとしている。再エネの出力制御指示については、FIT 法にもとづき前日に行う必要があるため、前日段階での需要や PV 出力の想定値をもとに策定する。これらの業務について紹介する（図 10）。

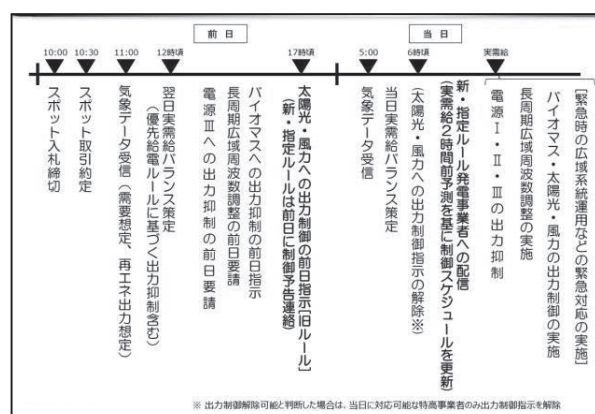


図 10 優先給電ルールに基づく出力制御スケジュール（四国電力 HP 掲載資料）

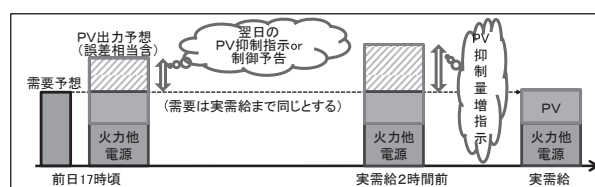


図 11 PV 出力制御量のイメージ

前日においては、午前中の気象情報をもとに需要想定、PV を含む再エネ出力想定を行い、翌日実需給バランスを策定し、優先給電ルールに則り PV の出力抑制の可否を判断することとなる。抑制が必要であれば、関係者への出力制御指示あるいは制御予告連絡を行うこととなる。

さらに当日においては、実需給の 2 時間前の段階での需要や PV 出力の予想に基づき出力抑制の要否判断を行い、制御スケジュールを更新する（図 11）。

PV の出力制御量については、前日における、あるいは実需給 2 時間前における PV 出力予測に PV 出力実績誤差相当量を加え算定される余剰電力としている。この実績誤差相当量を加えるのは、気象予報の誤差の影響等による調整力不足のリスクを排除し、電力の安定供給に努めるためである。

以上のようなことから、再エネ電源の出力抑制を極力少なくしつつ、電力の安定供給を図っていくためにも、翌日、さらには数時間先の PV 出力予測精度向上が非常に重要となるとともに、予測誤差などのデータ蓄積を行いデータ分析を進めることで、PV 抑制量を減少させることも必要である。

4. おわりに

PV の出力実績推定システムと出力予測システムの運用面からの要件と開発システムの現状について

紹介した。PV の導入量が増加するにつれて予測システムの果たす役割は益々重要になっている。今後も幅広い視点からシステムの高度化や精度向上を進めていきたいと考えている。

[謝辞]

本研究は、四国電力（株）の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，OS-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) 瀧川：“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”，四国電力，四国総合研究所 研究期報 104（2016/6）
- 13) 瀧川：“太陽光発電出力実績推定システムの高度化”，6-218，電気学会全国大会（2017/3）
- 14) 瀧川：“複数の数値予報を用いた太陽光発電出力予測の一考察”，250，電気学会電力・エネルギー部門大会（2017/9）
- 15) 瀧川，菅：“PV 出力実績推定・予測システムの運用面からの要件と開発システムの特長について”，日本太陽エネルギー学会 太陽光発電部会 第 25 回セミナー（2018/11）
- 16) JIS：“太陽光発電システムの発電電力量推定方法”，C8907（2005）
- 17) 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）
- 18) NEDO：“太陽光発電システム共通基盤技術研究開発報告書”（2007）
- 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) Richard Perez et al：“Validation of short and medium term operational solar radiation forecasts in the US”，Solar Energy, in press（2010）
- 21) 大竹，宇野，大関，山田：“最新の気象庁現業数値予報モデルの日射量予測の検証”，電気学会論文誌 B，Vol.138 No.11 pp.881-892（2018）

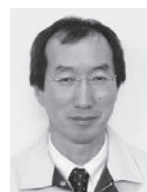
略歴

瀧川 喜義（たきがわ きよし）



株式会社四国総合研究所 研究主幹。1993 年愛媛大学大学院工学研究科修士課程修了。同年株式会社四国総合研究所に入社し、電力系統の安定化制御等の研究に従事した後、現在は再生可能エネルギーの出力予測システムの研究・開発を担当。1997 年愛媛大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士（工学）。

菅 史夫（かん ふみお）



株式会社四国総合研究所 電力技術部 副部長兼系統技術グループ長。1984 年横浜国立大学大学院工学研究科修士課程修了。同年四国電力株式会社入社。2014 年より現職。系統用蓄電池の制御や系統運用に関する研究に従事。