

再生可能エネルギー大量導入に向けた課題と取り組み

牛尾 剛

近年、地球環境問題を背景に太陽光発電や風力発電を代表とする再生可能エネルギーが注目を浴びており、電力系統に連系する分散電源が急増している。将来、再生可能エネルギーがさらに普及することを見据え、国の研究会などではこれに伴う課題の整理やその解決策に関するさまざまな議論が行われている。

本稿では、再生可能エネルギーの大量普及時における電力系統の課題とその課題解決に向けた関西電力の取り組みについて紹介する。

キーワード：再生可能エネルギー、低炭素、太陽光発電、電圧上昇、蓄電池

1. はじめに

電気は大量に貯蔵することが非常に難しい性質を持っているため、電力系統では瞬時瞬時の生産量と消費量をマッチングさせなければならない。仮に、消費量に対して発電量が少なかったり、逆に多かったりすると電力系統は不安定な状態となり、停電に至ってしまうことになる。情報通信や都市ガスなどのネットワーク産業にはない、生産（発電）と消費（負荷）の「同時・同量」の必然性こそが電気の財としての特殊性であり、電力系統が成り立つ最大の必要条件となっている。つまり、家庭で考えると、電灯をつければその分発電量を増やし、電灯を消せばその分発電量を減らすという制御を行っているということになる。実際には、個々の負荷に対して調整を行うのではなく、電力系統全体の使う量に対して作る量を調整している。

近年、わが国では低炭素社会の構築に向けて、太陽光発電や風力発電などの普及・拡大が進められている。これらの再生可能エネルギーは、枯渇する心配がなく、発電時に温室効果ガスを排出しないクリーンなエネルギーである一方で、天候によって出力が左右されるという特徴を有している。従来の電力系統にない特徴の電源が主に需要家側に大量に普及すると想定される中で、従来どおりの安定供給を維持するには電力系統側でさまざまな工夫が必要になってくる。

以上より本稿では、再生可能エネルギーの大量普及に伴う課題とその課題解決に向けた関西電力の取

り組みについて紹介する。

2. 再生可能エネルギーを取り巻く動向

現在、太陽光発電の政府導入目標は、2020年に2,800万kW（2005年の20倍）、2030年に5,300万kW（40倍）が掲げられている（図1参照）。この意欲的な目標の達成に向けて、政府は2009年に住宅用太陽光発電システム設置の補助金を再開するとともに、固定価格買取制度を新たにスタートさせ、実効性あるエネルギー政策を展開している。また、太陽光発電のみを買取対象としていた固定価格買取制度を2012年7月より風力や水力などにも拡大し、全量買取制度として再生可能エネルギーの利用拡大を推進している。

太陽光発電の国内導入量の推移を図2に示す。2009年度以降、補助金や買取制度の充実により急激に導入量が増加している。2011年度には住宅への普及が100万世帯を突破しており、今後もさらなる普及が見込まれている。

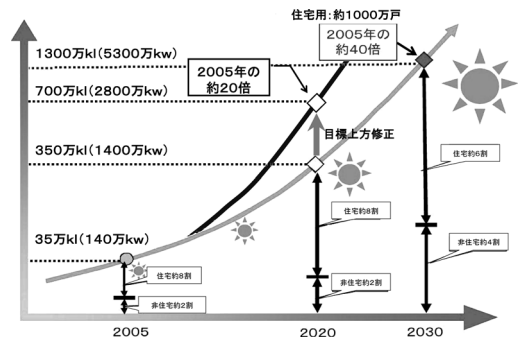


図1 太陽光発電の導入シナリオ [1]

うしお ごう

関西電力株式会社 電力流通事業本部 系統制御グループ
〒530-8270 大阪市北区中之島3丁目6番16号

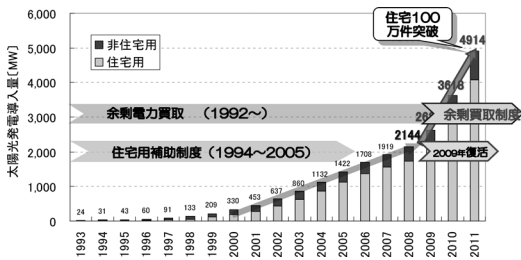


図2 太陽光発電の国内導入量の推移

3. 再生可能エネルギーの大量普及に伴う課題

従来の電力系統では、大規模電源で電気を作り、その電気を需要家に供給するという概念の下、電力設備の設計・構築がなされてきた。つまり、需要（変動）に対して発電し、需要家に向けて送る（電気の流れが単方向）という状況下で、電気の品質が適切に保たれるように設計されてきたのである。

現在、前章で述べたとおり、家庭への太陽光発電の普及が急激に増加してきている。これにより、電力系統では、天候によって出力が左右される太陽光発電などの小規模分散電源が広範かつ大量に分布しはじめており、電気の流れも需要家側から電力系統側に流れるなど、双方向になる状況が発生してきている。今後、さらに太陽光発電の普及が進み、導入件数が数百万件にのぼる状況になると、従来のような信頼度や品質を維持することが困難になる可能性も出てきている。

本節では、国の研究会 [2] など特に今後顕在化する可能性があると指摘されている電力系統の主な課題について3点紹介する。

3.1 周波数調整力の不足

電力系統の負荷は、家庭や工場、商業ビルなどさまざまな種類の負荷から構成されており、電気の使われ方は時々刻々と変化している。従来、電力会社ではこれらの変動に対して需要と供給のバランスを維持し、周波数を適切な範囲に保ってきたが、今後、太陽光発電などが大量に導入された場合にはその出力変動に対しても調整が必要となり、電力系統で調整しなければならない変動量が従来に比べて増加することになる。そのため、既存の火力発電や水力発電などの調整電源だけでは、それらの変動に対応できなくなる可能性があり、適切な周波数を維持することが困難になる。

周波数が適切に維持できなくなった場合には、工場などで使用する電動機の回転数が一定に保たれず製品の品質にムラができるなどの恐れがある。

この対策としては、周波数調整を目的とした蓄電池の設置や揚水発電所の可変速化などが挙げられる。

3.2 余剰電力の発生

余剰電力とは、電力の消費に対して供給が上回る場合に発生する電力のことを言う。太陽光発電が大量に導入された場合、工場の操業が一斉に止まる年末年始やゴールデンウィークなど電力消費が特に少なくなる期間や、空調のための電力消費が少なくなる春や秋の週末において、余剰電力が発生することが懸念されている。

この対策としては、蓄電池の設置や揚水発電の新増設による余剰電力の吸収のほか、電力需要の新規創出や余剰電力の発生量を軽減するための太陽光発電の出力抑制などが検討されている。

3.3 配電電圧の上昇

太陽光発電の設置箇所において発電出力が電力消費を上回ると、余った電気が電力系統（配電系統）側に流れ、配電系統の電圧が上昇する。太陽光発電が局所的に集中すると配電系統の電圧は大きく上昇することになり、電気事業法の第26条に基づく適正值（ $101 \pm 6V$ 、 $202 \pm 20V$ ）を逸脱する恐れがある。この対策としては、柱上変圧器の分割設置、線路用電圧調整器（SVR：Step Voltage Regulator）や静止型無効電力補償装置（SVC：Static Var Compensator）などの電圧調整装置による電圧制御、配電系統の運用の高度化などが挙げられる。また、太陽光発電システムにおけるPCS（Power Conditioning System）の無効電力制御による電圧対策も検討されている。

4. 再生可能エネルギーに関する取り組み

関西電力では、低炭素社会の実現に貢献すべく、図3に示すような関電のスマートグリッドの構築を進めている。スマートグリッドの定義は国や地域によってさまざまだが、関西電力では「基盤となる電力系統の安定性（電圧や周波数など電気の品質）を失うことなく、低炭素社会の実現とお客さまの利便性向上を目的に、情報通信技術、蓄電池技術などの新技術を用いて、高効率、高品質、高信頼度の電力流通システムの実現を目指すもの」と位置づけている。

本章では、関電のスマートグリッドの構築に向けた取り組みについて紹介する。

4.1 再生可能エネルギー電源の開発

低炭素社会の実現に向けて再生可能エネルギーの開発・普及に取り組んでおり、国内最大級の堺太陽光発電所（図4）や河川維持流量を利用した大桑野尻水力

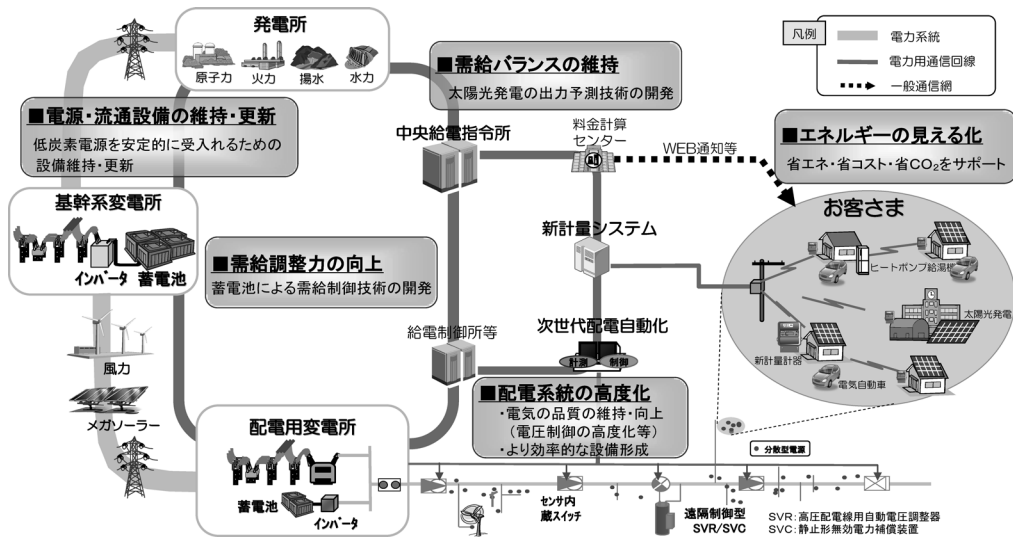


図3 「関電のスマートグリッド」の構築



図4 堺太陽光発電所

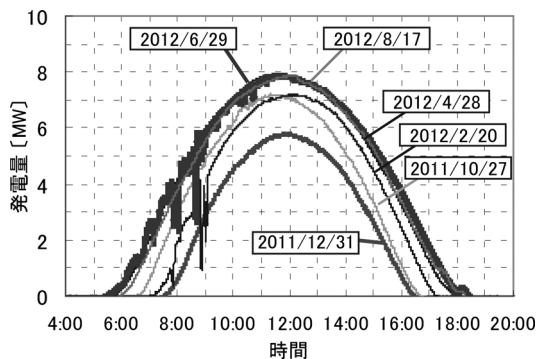


図5 堺太陽光発電所出力実績（晴天時）

発電所などの運転を開始している。また、舞鶴石炭火力発電所では、2008年よりバイオマス燃料である木質ペレットを石炭と混焼させて発電し、石炭の消費を抑制することでCO₂の排出量削減を目指している。

今後も福井県若狭地域における大規模太陽光発電所の建設や既設設備の余力を有効活用した新黒礁第二発電所の建設、グループ会社による淡路風力発電所の開発などを通じて、電気の低炭素化を図っていく予定である。

4.2 太陽光発電の実態把握

太陽光発電が大量に普及すると、その影響を考慮した電力システムの運用が必要になる。例えば、生産と消費の同時同量の維持（以降、需給バランスという）においては太陽光発電の出力分を考慮する必要があるほか、送配電線に流すことのできる量的制約においても配慮が必要になってくる。よって、太陽光発電の出力実態や特徴を把握することは安定供給を維持するうえで非常に重要になってくる。

本節では、局所集中エリアと広域エリアの視点から太陽光発電の出力特性について紹介する。

(1) 局所エリアにおける出力特性（堺太陽光発電所）

2011年9月に全面運用開始した堺太陽光発電所（10MW）の出力実績を例に局所集中エリアにおける出力の特徴を紹介する。

図5に晴れの日での発電所出力を示す。雲ひとつない青空で太陽の日射を遮る要素のない日は、釣鐘形のような出力曲線を描く。また、季節によって太陽の高度が変化するため、図に示したとおり、出力の最大値や発電時間帯が異なることがわかる。これは、同じ天候であっても、季節によって期待できる発電量が異なることを示しており、翌日の出力を予測する際に考慮すべき項目になる可能性を含んでいる。

図6に天候による発電所出力の違いを示す。曇から晴れ、あるいは晴れから曇や雨に天気が変わる場合、雲

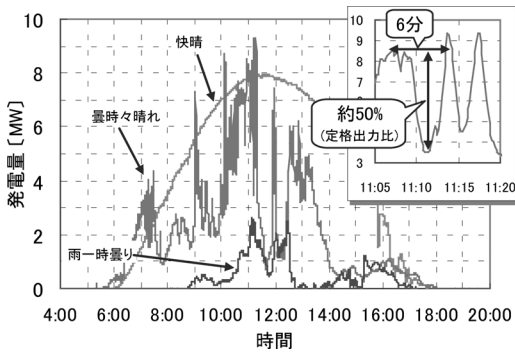


図6 堺太陽光発電所出力実績（天候別）

が流れながら日射を遮るため、出力変動が比較的大きくなり、この例では約6分間で定格出力の50%(5MW)以上もV字に出力変化が起こっている。また、雨の日は、もとの太陽光発電出力が小さいため、変動幅は小さい。これは、変動の対応に必要となる調整力の確保量が天候によって異なることを示している。また、太陽光発電の出力変動は、発電所近傍の電圧にも大きく影響を与えるため、事前に電圧に対する検討が必要になる。将来の大量普及に向けた電圧変動に対する取り組みについては、4.5節で紹介する。

(2) 広域エリアにおける出力特性

需給バランスは、関西エリア全体で維持しなければならない。つまり、分散的に広く普及した太陽光発電の発電合算量（出力変動）と関西全体の負荷量（負荷変動）に対して、既存電源を活用しながら需給バランスを維持することになる。

太陽光発電が広域的に普及した場合の出力変動量の合計は、地点間の出力変動の相関に大きく左右される。複数地点の変動が無相関である場合は、いわゆる $1/\sqrt{N}$ 則が成立することが知られており、仮に同じ変動幅を持つ N 箇所の変動波形が独立（無相関）であれば、その合計値の変動は \sqrt{N} に、平均値の変動は $1/\sqrt{N}$ にそれぞれ比例することになる。気象学上、地理的距離がある程度離れると天候の相関が弱くなるため、太陽光発電が広域的に分散配置された場合、異地点間の出力変動の相関は小さくなる（無相関に近づく）と考えられる。それゆえ、太陽光発電出力変動が大きな場合でも、広域に分散配置されている太陽光発電の出力を合算して出力変動をとらえることで、平滑化効果を期待することができ、個々の変動率よりも小さな変動率としてとらえることができる。実際、図7に示すように、関西における複数地点の日射データを合成（図7は単純合成）すると、平均出力の変動率は個々の地点の変動率よりも小さくなっている。このことから、太

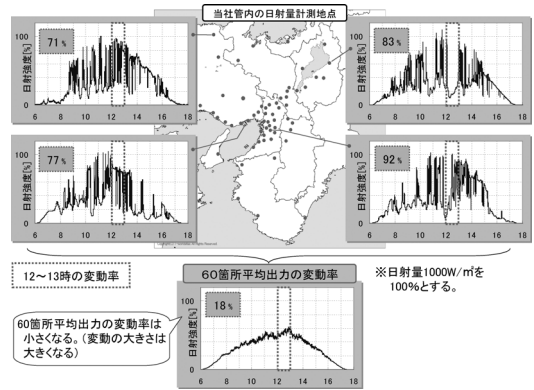


図7 平滑化効果の例

陽光発電が広域に普及した場合には、平滑化効果が期待できると考えられる。

4.3 蓄電池を用いた需給制御システムの開発

本節では、3.1節で述べた周波数調整力の不足に対する取り組みについて紹介する。

(1) 蓄電池による調整力の確保

蓄電池を用いた需給制御システムの動作イメージを図8に示す。図8の中央の状態では需給バランスが維持されており、安定的に電気が供給されている。この状態から、仮に雲がパネルの上から移動して日なたとなった場合には、太陽光の出力が増加するため、右の状態になり、供給量が需要よりも多くなることから周波数は上昇する。この場合、安定供給を維持するために中央の状態に戻さなければならないが、アンバランスとなった電気を瞬時に蓄電池に充電することで、中央の状態に戻すことができる。同様に、パネルの上に雲がかかると左の状態となり、アンバランス分を蓄電池から供給（放電）することにより中央の状態に戻すことができる。

比較的短時間での太陽光発電の出力変動に対応するには、すばやい応答性 (kW/Sec) と調整力 (kW) が求められる。一方、短時間に電力の調整（出し入れ）を行

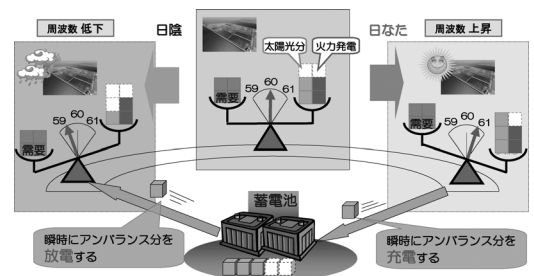


図8 蓄電池の活用イメージ

うため、揚水発電所のように夜間電力を蓄電し、昼間に放電するような容量 (kWh) は必要としない。現状、蓄電池はコストが高いという課題があるものの、上記要件と特質が合致していることに加え、設置場所の制約が少なく、太陽光発電の導入スピードに応じた設置が随時可能と見込まれることから、将来の需給制御システムへの活用が期待できる。以上より、追加的な周波数調整力の確保に向けた一方策として、蓄電池を用いた新たな需給制御システムの開発に取り組んでいる。

(2) 実証設備の概要

堺太陽光発電所が連系する石津川変電所に最大出力 250kW、容量 100kWh のニッケル水素電池を連系し、制御装置からの出力指令により蓄電池を制御するシステムを構築した。全体構成の概要を図 9 に示す。

本実証における蓄電池の制御領域は、電力系統の負荷変動に対し、数秒から 20 分程度の比較的短い変動周期をターゲットとしている。また、蓄電池の充放電制御を常に活用するためには、満充電状態や完全放電状態を避けなければならないため、制御ロジックには残量管理機能を実装している。

(3) 蓄電池の制御イメージ (短周期変動対応)

蓄電池の制御イメージを図 10 に示す。図 10 は、最も短い周期の変動 (数秒~数分) に対応する制御系 (一般的に GF 制御 [3] と呼ばれる制御モード) の動作イメージである。

ここで、重要となるのが上記 (2) で述べた蓄電池の残量管理である。そこで、本実証システムには残量が低下 (上昇) すると強制的に適正な範囲まで回復させる機能を盛り込んでいる。しかし、蓄電池が単独で残量を補正すると、系統全体として需給バランスが合わなくなるため、補正相当量を火力機の増 (減) 出力により対応する仕組みとしている。このような制御により、長周期で残量管理を行いながらも、常に短周期変動に対応できるロジックとしている。これまでの実証試験では、需給制御機能や残量管理機能が想定どおりに動作しており、短周期変動に対応しながらも残量を維持した運用ができることを確認している。

4.4 太陽光発電の出力予測技術の開発

本節では、3.2 節で述べた余剰電力の発生に対する取り組みについて紹介する。

(1) 需給計画の策定

電力会社では、需給バランスを常に維持するために、事前に発電機の運転計画を策定して、必要な電源を準備している。この運転計画の策定にあたっては、電力の需要予測に加え、発電設備の突発的な異常に対する

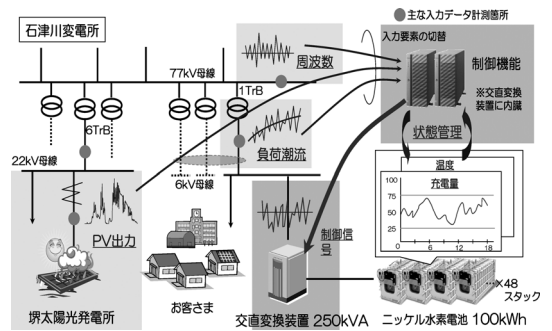


図 9 実証設備の構成概略図

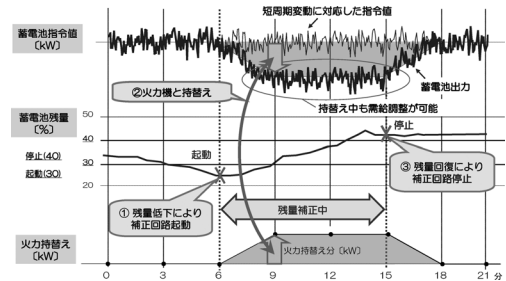


図 10 蓄電池制御イメージ (GF 制御)

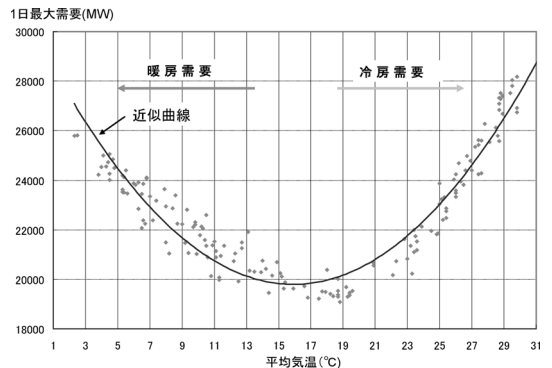


図 11 関西電力における気温と電力需要の関係

リスクも考慮されている。電力需要については、図 11 に示すように 1 年を通して気温と強い相関があることがわかっており、過去の分析結果をもとに、景気などの諸情勢を織り込みながら予測している。

一方、太陽光発電は天候により出力が変化するため発電出力の予測が難しい。太陽光発電の出力を精度よく予測できれば、待機電源の確保量を減らすことが可能のため、出力予測技術の開発が重要となる。

(2) 予測技術の開発

太陽光発電の出力を予測するには、最も大きな影響を及ぼす因子である日射量を正確に予測する必要がある。現状の翌日予測と実績値を図 12 に示す。

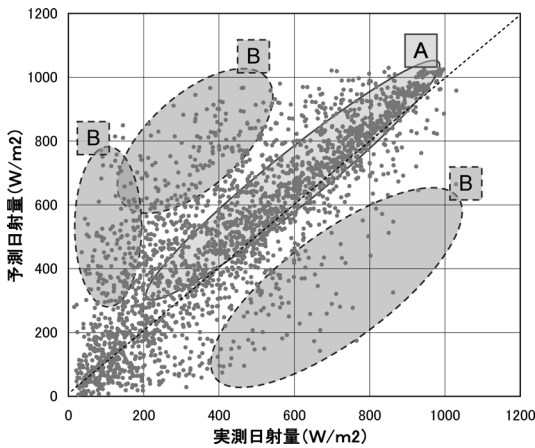


図 12 翌日予測値と実績値
(尼崎市：2010.3～2011.2, 9～15 時)

この図からわかるように全体的に実績よりも若干大きめに予測する傾向が見られる (A エリア)。これは、降雨予測などに用いられている総合気象予測モデル (SYNFOS-3D：日本気象協会) を用いて日射量を予測した結果、降雨に影響しない雲の影響が出たためである。

これを補正するために、日本気象協会との共同研究で過去の誤差傾向を統計的に分析し、予測値に対する補正量を定式化することを試みた。その結果、気象条件が近い過去のデータを抽出し、誤差の傾向を近似式として把握することにより、平均二乗誤差の年間平均値を 171.17W/m^2 から 141.36W/m^2 まで改善できる結果が得られている。

一方、現状の予測技術では、B エリアのように大幅に予測が外れる事象がある。これらは、台風の影響や前線位置の予測ズレ (前線の東と西では大きく天候が変わる) などに起因するものが多く、事前に精度良く予測することが難しい場合が多い。図 13 に台風の影響により予測が大幅に外れた結果を示す。8/9、8/10 の予測では、晴天時と同程度の日射量を予測していたにもかかわらず、実際には 1 日を通じてほとんど日射を得ることができていない。これは、期待していた太陽光発電の電気を火力発電機等で補う必要が出てくることを意味する。

このように予測が大きく外れると想定される気象条件下では、事前に予備力を多めに確保して、当日の運用に対応することになる。よって、大幅な予測誤差がどのような気象条件の時に発生し、どの程度のズレになるのかを把握することが重要になる。現在、予測天気図を複数の分類パターンに仕分けし、パターンごとに

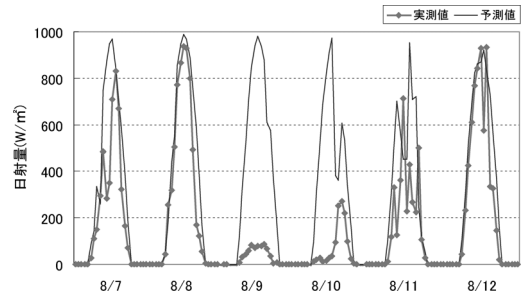


図 13 日射量の予測

日射量予測誤差の出現傾向を分析している段階である。

4.5 次世代配電自動化システムの構築

本節では、3.3 節で述べた配電電圧の上昇の対策として取り組んでいる次世代配電自動化システムの構築について紹介する。

(1) 配電系統情報監視による電圧集中管理

変電所から需要家へ向けた一方向の電力潮流を前提として設備構築してきた従来の配電系統では、変電所の出口 (送電端) で電圧と負荷量を計測することにより、配電線の電圧やお客さまの受電端電圧を推定することができていた。しかしながら、今後太陽光発電が大量に普及すると需要家から配電系統に電気が流れるなど、電力潮流の向きが一方に限らなくなるため、従来の限られた計測点データと制御方法だけでは、配電系統の電圧管理ができなくなる可能性がある。

そこで、この課題を解決するために図 14 に示す電圧集中管理システムの研究開発を進めている。この集中管理システムでは、配電線の状況をよりきめ細やかに把握するために、電圧や負荷量の計測が可能なセンサ内蔵自動区分開閉器を配電線に設置し、そこから得られる電気的情報を配電自動化サーバで解析する。このことにより、配電系統における電圧調整機器の最適な制御を行うことが可能となる。

(2) センサ内蔵自動区分開閉器の採用

電圧集中管理を行うためには、配電系統の状態監視が必要になるが、これまでに設置してきた自動区分開閉器には計器用変流器 (CT) などのセンサは付加されていない。よって、次世代配電自動化システムの構築にあたって電圧集中管理に必要な要件を満たすセンサ内蔵自動区分開閉器を開発し、現在、既設の自動区分開閉器の取替工事に合わせて、順次センサ内蔵自動区分開閉器の現場導入を進めている。このセンサ内蔵自動区分開閉器の外観を図 15 に示す。

(3) 遠隔制御形電圧調整器の開発

従来の高圧三相自動電圧調整器 (SVR) は、機器ごと

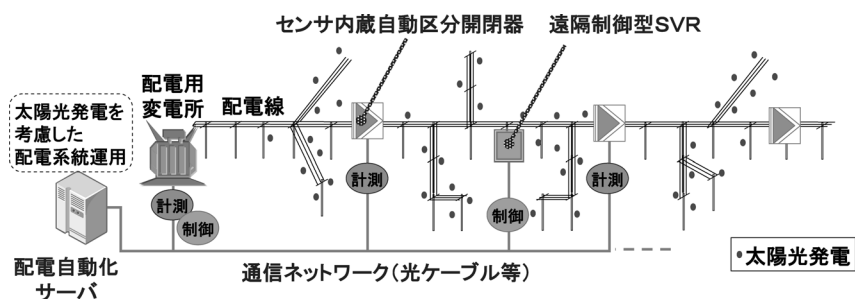


図 14 電圧集中管理システムの構成イメージ

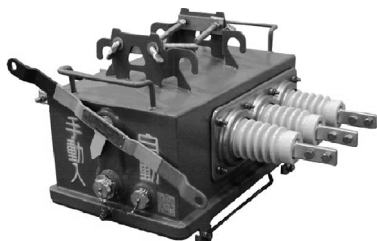


図 15 センサ内蔵自動区分閉器

に調整目標値を設定し、それぞれの機器が独立して電圧調整を行う仕様であった。そのため、遠方の指令に基づいて制御できる遠隔制御形 SVR を開発し、柔軟な機能拡張を考慮して下記の仕様を新たに加えている。

- 将来の通信方式変更に対応するために通信部を外部設置とし、SVR 子局を開発
- 昇圧比（昇降圧タップ）指令、目標電圧指令の両方に対応するため、外部に制御ユニットを増設できるインターフェースを装備

現在、既設 SVR の取替工事などに合わせて、遠隔制御形 SVR の現場導入を順次進めている。

5. まとめ（おわりに）

低炭素社会の実現に向けて普及拡大が期待されている太陽光発電や風力発電だが、出力が天候によって左右されるといった特徴から、これまでにはなかった新たな課題が予想されている。

関西電力ではより低炭素な電気を安定的にお届けするために、今後も継続してさまざまな研究開発を推進していく。

参考文献

- [1] 低炭素電力供給システムに関する研究会 報告書、2009.
- [2] 経済産業省次世代送配電ネットワーク研究会 報告書、低炭素社会実現のための次世代送配電ネットワークの構築に向けて、2010.
- [3] 電気学会技術報告、869、60-61、2002.