

環境技術としてのエネルギーマネジメント ～自然エネルギーの価値向上をめざして～

早稲田大学 理工学術院 教授
若尾 真治



1. はじめに

地球温暖化現象が顕在化して以来、環境エネルギー問題に対する取り組みの一つとして、Clean（環境に優しい）かつRenewable（再生可能）という特長を有する自然エネルギーの活用技術が、世界規模で盛んに研究開発されています。日本においては、その中でも特に太陽光発電（Photovoltaics、以下PV）に注目が集まっており、2008年に閣議決定された「低炭素社会づくり行動計画」では、PVの導入量を2005年基準の140万kWに対し、2020年に10倍、2030年に40倍とすることを目標に定めています。また翌年の2009年の「経済危機対策」においては導入目標が前倒しされ、2020年頃までに20倍程度の約2800万kWの導入をめざすとの方針が示されました。この目標値は、日本の電力会社10社の発電容量の1割を超える規模に相当します。近年、PV導入促進のための具体的な取り組みとして、住宅、産業、公共などの部門へのPVの設置、発電効率向上や発電コスト低減をめざす革新的PVの技術開発、固定価格買取制度など、さまざまな施策が推進されています。日本ではこれまで数kW～数十kW規模の小規模分散形式で導入が進んできた太陽光発電ですが、一つのシステムでMW規模を有する、いわゆるメガソーラーも数多く建設されています。

これまで太陽光発電に関しては、発電効率の向上に代表されるような、太陽電池自体、すなわちデバイス分野における技術開発が中心的な位置を占めていました。これは、日射エネルギーの密度の低さから、まとまった量の電気エネルギーを生み出すためには大面積を要するという難点が根底にあります。

その他に、一般に自然エネルギー特有の難点として、気象条件により発電出力が変動することが挙げられます。先に述べた規模でのPV大量導入を想定した場合、後者の難点が及ぼす影響がより重大なものとなります。発電した電気エネルギーを負荷に届けるためには電力ネットワークを介することとなりますが、時々刻々と変動する負荷のみならずネットワーク上に出力制御に難がある太陽光発電の割合が増えるにしたがって、電力の余剰・不足の不確定性は増大の一途を辿り、電力品質の低下や保護保安上の問題などが深刻化するからです。自然エネルギーから電力を生み出しても、それを負荷まで安定性と経済的合理性を備えつつ

Profile

経歴

- 1965年 福岡市生まれ
- 1989年 早稲田大学理工学部電気工学科 卒業
- 1993年 早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程 修了、博士(工学)
- 1993年 早稲田大学理工学部助手
以後 専任講師、助教授を経て
- 2006年 早稲田大学理工学術院教授、現在に至る

主な役職

内閣府総合科学技術会議評価専門調査会「太陽エネルギーシステムフィールドテスト事業」評価検討会委員、経済産業省総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会電力安全小委員会委員、日本太陽エネルギー学会理事など。

輸送できなければ、環境に優しく再生可能であるという価値は半減します。

現在のPV大量導入を間近に控えた状況のもと、電力ネットワークにつながる制御可能なものを総動員して、ネットワークシステム全体でバランスを取り安定化を実現しようというシステム分野の研究開発の重要性が、急速に高まっています（図1）。本稿では、太陽光発電の価値を測る物差しについて幾つかの切り口から整理した後、その価値を向上させるためのシステム技術の現状と今後の展望について述べたいと思います。

2. 太陽光発電の価値

太陽光発電の価値を定義するのに、まず代表的なものとして、発電システムのライフサイクルにおいて創出する総電力量が挙げられます。いわゆるkWh価値と呼ばれるもので、購入電力量の削減や売電収益などの経済的な価値につながると同時に、商用電力が主に化石燃料依存であることを考えれば、輸入燃料削減などエネルギーセキュリティー向上につながる効果も期待できます。現在よく用いられる代表的な数値としてPV稼働率を12%とすると、24時間×365日×稼働率12%≒1000kWh/kWと考えることができ、PVシステムの

年間発電電力量は設備容量1kWあたり約1000kWhとなります。住宅における一年間の平均的な電力需要は約4200kWhですので、3kWのPVシステムを設置すれば70%強の家庭内消費電力を賄うだけのkWh価値があると見なすことができます。

次に、最大需要発生時にPV設備容量に対してどの程度の発電出力比率を期待できるかという視点で価値を定義する方法があります。これはkW価値と呼ばれるものです。もし、真夏の日中の最大需要発生時にPV設備容量最大限まで確実に発電可能であれば、その分、既存の火力発電などの系統電源を代替できることとなり、kW価値（すなわち設備代替率）は100%と言えます。しかし実際は、先にも述べたとおり、自然エネルギーの本質として出力変動の難点がありますので、kW価値の値はずっと小さくなります。これまで、電力供給不足確率（LOLP: Loss of Load Probability）や、L5手法、K90手法などさまざまな方式によりkW価値が評価されていますが、計算に使用するデータセットの条件や品質に結果は大きく影響を受けます。例えば、想定するPV導入量が増大するにつれ（言い換えれば、PVの設置範囲が広がるにつれ）、その出力変動の度合いは均されることとなります。また、前提とするデータのサンプリング時間によっても、変動

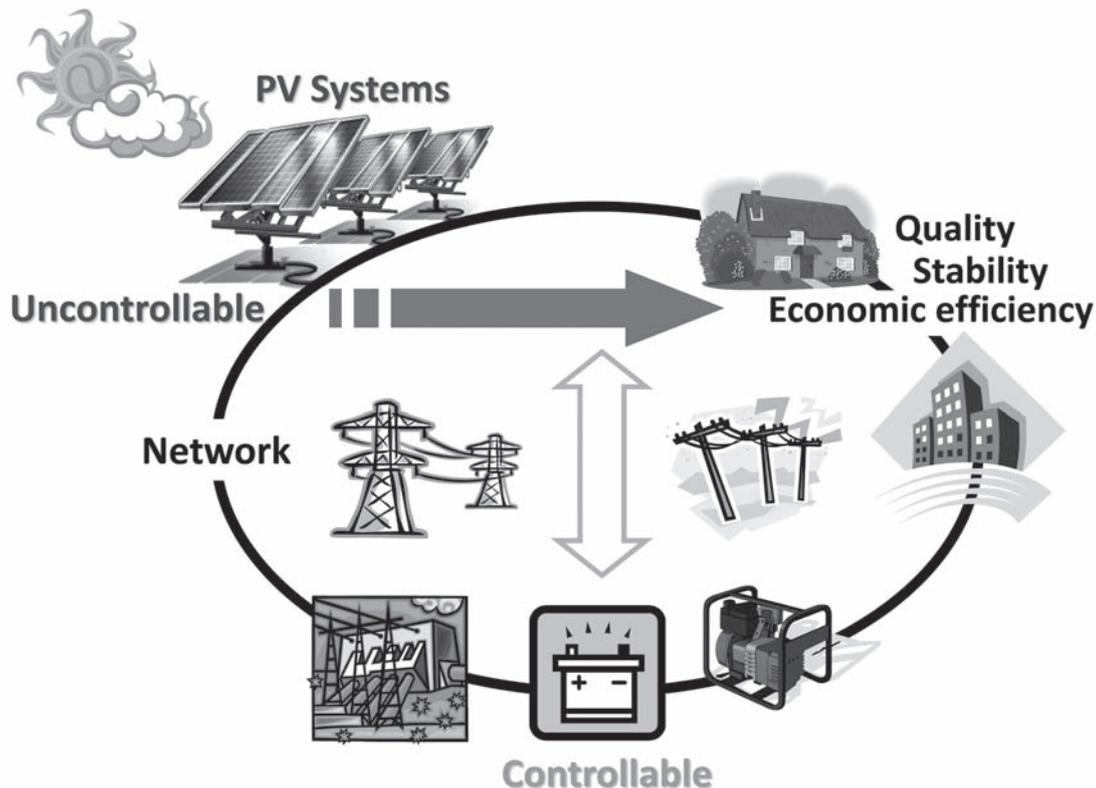


図1 電力ネットワークと太陽光発電

の評価は変わってきます。今後、より精確なkW価値の算定に向けて、高品質な計測データの蓄積がまずは重要と考えられます。また、大量導入時のPVの出力変動は、低圧配電線における電圧上昇問題や、短期的な需給バランスの崩れによる周波数調整問題などにも関連することから、kW価値は電力ネットワークにおける電力品質と密接に関わる指標とも言えます。

最後に、太陽光発電の価値を、化石エネルギーの代替によるCO₂排出量削減効果の視点で考えてみます。すなわち、PVの環境価値と呼べるものです。その評価手法としては、LCA (Life Cycle Assessment) 手法が代表的なものとして挙げられます。LCAでは、PVシステムの原料採取、製造、輸送、使用、廃棄までの全過程において投入したエネルギーや輩出したCO₂を積み上げて集計することで、環境への影響を定量的に評価します。そして具体的な指標としては、PVシステムのライフサイクルに投入された全エネルギー量を年間PV発電電力量で除したEPT (Energy Payback Time) や、PVシステムのライフサイクルにおける全CO₂排出量を耐用年数期間に発電した全電力量で除したCO₂排出原単位などが用いられます。これまでさまざまな報告がなされていますが、これらの値は評価対象の想定寿命などの前提条件に大きく影響を受けます。同条件での比較を行うためには、一例として国際エネルギー機関 (IAE: International Energy Agency) から提案されているガイドラインなどを参考にするなど、留意が必要です。

以上、太陽光発電の価値を3つに大別して述べましたが、これらの価値をより向上させていくことがPVの導入促進に欠かせません。そのためにシステム技術が果たすべき役割はこれまで以上に重要と考えられます。例えば、環境価値においてCO₂排出原単位の低減をめざす場合、定義式の分母に相当する耐用年数期間の総発電電力量を向上させるために、デバイス技術のみならず、インバータをはじめとするシステム構成要素の長寿命化や、精確なモニタリングや故障診断による長期信頼性の確保など、システム技術の貢献も必須となります。耐用年数期間の総発電電力量向上は、文字どおりkWh価値の向上でもあります。

太陽光発電はCleanかつRenewableという本質の特長を有しており、その意味で環境価値とkWh価値は、今後もさらなる向上をめざすことには変わりはありませんが、はじめから高い(プラスの)価値として認識されてきました。一方、電源としてのkW価値は、PVの出力不安定性ゆえにこれまで

低い(マイナスの)評価に留まっており、このkW価値の向上が、電力ネットワークへのPV大量導入に向けて重要課題と言えます。

3. 太陽光発電における電力ネットワークとの協調技術

ここでは、PVのkW価値の向上に焦点を当てて、それに関わるシステム技術の動向について述べたいと思います。代表的な例は、PVシステムに蓄電池を併用して充放電制御し、システム全体としての出力を安定化させる技術です。具体的には、電力ネットワークとの連系点潮流やPV自体の出力変動をオンラインで計測し、制御目的に応じた蓄電池の充放電を行うものです。

これまで、PVシステムと組み合わせる蓄電池としては鉛蓄電池が主流でしたが、最近ではエネルギー密度が高いリチウムイオン電池の大容量化が実現され、応用事例が増えています。リチウムイオン電池には、貯蔵可能なエネルギーが大きい高エネルギー型と大電流の充放電が可能な高入出力型とがあり、用途に応じて使い分けられています。例えば、PV出力の短時間変動の補償用途であれば、後者が適用されます。

蓄電池併設によるPVへの可制御性付加の目的もさまざまなものがあり、メガソーラーにおける計画発電、電力ネットワークにおける電圧や周波数などの電力品質維持(系統安定化)、負荷のピークカットによる受電電力の平準化、瞬停対応も含めてのUPS (Uninterruptible Power Supply) 機能、マイクログリッドなどにおける自立運転、防災対策電源、電気自動車の充電ステーションなどが開発・実運用化され、数多くの報告がなされています。

一方、先に述べた蓄電池による直接的な制御以外に、電力システム全体での新たな需給調整力の向上策として、PVの発電予測技術と需要の能動化技術が挙げられます。PV発電出力の予測情報に基づき、住宅やオフィスビルなどにおいて快適性を損なわない範囲で種々の需要機器を制御して需給調整力を確保するもので、これはPVのkW価値を相対的に向上させる間接的な技術と言えます。

PV出力の予測技術は、その用途(予測の対象時刻や時間・空間解像度、更新頻度など)や使用する入力データ、使用する予測モデルなどにより分類でき、さまざまなものが検討されています。主な入力データとしては、単地点/広域の実測気象データや、直近の発電実績データ、衛星観測デー

タ、気象庁によるGPVデータ（Grid Point Value: 気圧、気温、風などの時間変化を物理モデルに従って大規模数値解析により予測したもの）などが挙げられます。また、用いられるモデリングの手法も、物理モデル、回帰モデル、ヒューリスティックモデルなど多岐にわたり、予測精度の向上を目指した研究開発が盛んにおこなわれています。

今後、PV出力予測情報に基づき、蓄電装置の充放電制御のみならず、空調やヒートポンプ給湯システムなどある程度のタイムシフトが許容される負荷の制御も加わり、電力ネットワークにつながる制御可能なものを効果的にかつ最大限に協調させるエネルギーマネジメント技術の実現が期待されます。

4. 今後の展望

2011年3月11日の東日本大震災により首都圏でも計画停電が行われ、電気エネルギーが現代社会を支える重要な基盤要素であることを、私たちはあらためて認識することとなりました。このような背景のもと、太陽光発電に対しては、防災用電源だけではなく、平常時の電源インフラとして今後どのような役割を担うことが可能なのか、議論が活発化しています。これはエネルギーの選択肢を多様化させることであり、日本のエネルギー安全保障に関わってくる問題です。

本稿でも先に述べましたが、部分的にせよ電源インフラとしての責任を果たせるだけのPV導入量を実現するためには、PVの電源価値をさらに向上させるシステム技術、特に、太陽光発電システム側と既存の電力供給ネットワーク側の双方が情報を共有しながら両者を効率よく円滑に運用する最適なエネルギーマネジメント技術の開発が、今後一層重要になるものと考えられます。

この最適化問題を、設計変数、目的関数、制約条件の切り口で見た場合、設計変数、目的関数が多数含まれる非常に難度の高い複雑な問題であることがわかります。すなわち、インフラとして公共性が高まれば、太陽光発電が満たすべき評価項目（目的関数）も、電力品質や保護・保安、環境性・経済性など多様になります。評価項目が増えるに従って、評価項目同士のトレードオフが生じることも考えられます。また、エネルギー需要において電化が急速に進む昨今、家庭負荷に対するスマートメーターなどの情報技術の整備に加え、電気自動車によるV2H（Vehicle to Home）など、これまでになかった制御要素（設計変数）が多数創出されています。太陽光発電の大量導入時に発生する問題の多くはそ

の出力不安定性に起因するものであり、ある対策（設計変数値の変化）が複数の課題（目的関数値）に対して改善効果をもたらす可能性もあり、両者の相関は容易には把握できなくなります。さらに、インフラの移行は十年単位のスパンで考えなくてはなりませんので、ある時間断面だけで議論するのではなく、インフラの移行プロセスも視野に含めて、より実効性のある最適な解を探索していく必要があります。

このような複雑な問題の解を見出すうえで、特に、適切な制約条件の議論が重要であると、私は考えています。この制約条件は、電力品質などの物理現象から課される制約以外に、社会システムの枠組みからも規定を受ける面があり、その意味で人為的に変更・適正化できる余地があります。制約条件の設定の仕方により、解の探索空間は広くもなり、狭くもなります。際限ない一部の利便性の追求や極めて局所的な便益の確保などが制約条件に含まれてしまうと、どのような手段を講じても有効な解を見出せないほど探索空間を狭める結果に陥ります。

3.11の経験を経た今、環境エネルギーに関わる最適化問題を上手く作り上げることができるかどうか、資源小国・日本が国際競争力（国力）を今後も維持・強化できるかどうかの岐路に立っていると思います。

参考文献

- 1) 若尾 真治, 林 泰弘, 大関 崇, 植田 譲, 林 秀樹, 荻本 和彦, 伊藤 雅一ほか, 平成24年電気学会全国大会シンポジウム「太陽光発電システムの価値向上技術の現状と展望」, 2012