



iea wind

Task 25 変動性電源
大量導入時の
エネルギーシステムの
設計と運用

風力・太陽光発電の系統連系

風力発電所や太陽光発電所は、他の新規発電設備と同様、電力系統に連系する必要があります。ここでは、風力・太陽光発電の出力の変動性や不確実性によって、電力系統の信頼度や効率性、需給バランスを維持する能力がどのように影響を受けるかについての懸念事項を取り上げます。

風力発電・太陽光発電は、他の電源とどう違う？

風力発電や太陽光発電が他の電源方式と異なる主な点は、変動性と不確実性にあります。場合によっては、需要の大きな都市部から離れた場所に立地が限られることもあります。また、系統への接続は、技術的に従来電源とは異なります。

- 従来電源は一定出力が可能であり、必要に応じて起動・停止だけでなく、出力の増加や減少を行うことも可能です。これは**ディスパッチ可能**(制御可能)と呼ばれます(運用上の失敗が生じた場合を除く)。
- 風力・太陽光発電は、風や日射量によって変化します。しかし、多くの風力・太陽光発電所を電力系統内のあるエリアで**集合化**すると、出力の変動が平滑化されます(図1)。
- 不確実性に対処するために、風力発電や太陽光発電の出力を数分前、数時間前、更には数日前から予測することができます。数分前や数時間前の予測は、12~48時間前の予測よりも正確です。複数の発電所をより広いエリアで集合化すると、どの時間枠でも予測精度が向上します。

下記のファクトシートも参照下さい。
No.9 「風力発電大量導入時の変動性と予測可能性」

風力・太陽光をどうバランスさせる？ 風力・太陽光には専用のバックアップ電源が必要？

電力系統では、事故による発電所の停止だけでなく、需要の変動も発生します。風力・太陽光も同様にバランスが取られます。

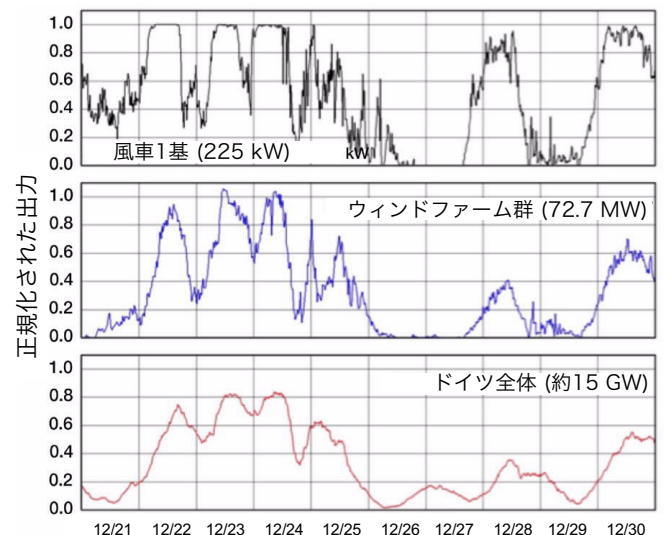


図1. 風力発電所のあるグループ(中央)を集合化すると、単一の風車(上)の短期の出力変動が平滑化される。ドイツ全体(下)のすべての風車からの出力を集合化すると、変動が更に滑らかになる。中央のグラフに見られるように、狭いエリアで集合化すると、定格容量を超える場合がある。
(出典: Task 25 第1期最終報告書, 2009)

- 変動する需要と供給のバランスを取るために、系統運用者(訳注: 日本では一般送配電事業者)は一部の発電所の出力を調整します。また、調整可能な需要も拡大しています。需給バランスはこのようにして取られています。
- 需要の変動と風力・太陽光の出力は、しばしば互いに相殺されます。風力・太陽光や需要による突発的で急峻な変化は稀頻度の事象です。
- 電力系統の需給バランスは、系統全体レベルで需給インバランス(不均衡)を集合化し(ネットインバランス)、系統運用者によって調整されます。

- 電力系統全体の広い範囲に分布する風力・太陽光発電の出力の変動は、電力系統がこれまで経験してきた他の不確実性と混ぜ合わされ、分単位のネットインバランスだけが調整されます(訳注: 自動制御の負荷周波数制御(LFC)などでは、秒単位で出力を調整している)。
- 電力系統は系統レベルで需給バランスを取るものなので、専用のバックアップ電源や蓄電池を単一の変動電源に割り当てることは望ましくありません。風力や太陽光に限定してバックアップ電源や蓄電池を導入するのは非効率であり、必然的に割高なコストがかかります。

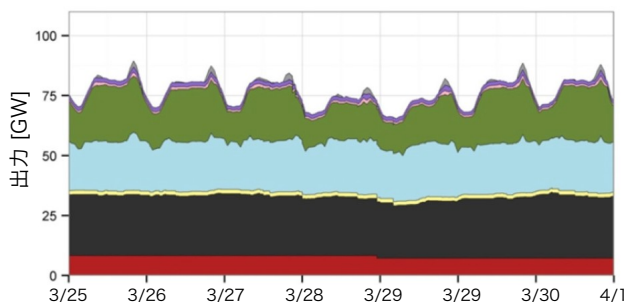
下記のファクトシートも参照下さい。

No.7 「風力発電と電力貯蔵」

風力・太陽光の変動をどのように調整する？

系統運用者は、各時間帯に予想される需要を満たすような発電計画を作成します。リアルタイムでの予期せぬ変動でも需給バランスを取るため、予備の容量(予備力)を確保しています。

- 発電所の出力は事前に計画されており、個々の発電所の出力は実供給時間に近くなるに従って微調整されます(訳注: 時間前市場を用いた調整など)。
- 系統運用者は、運転予備力(迅速に出力増減できる発電所またはデマンドレスポンス)を用いてリアルタイムで需給のバランスを取ります。
- 予想される範囲内の風力・太陽光発電の増減に対しては、他の発電所の発電計画を修正させます(図2)。予期せぬリアルタイムの変動がある場合は、運転予備力を使用します。
- 需要から風力・太陽光発電の出力を引いたものは**残余需要**と呼ばれます。運転予備力は、残余需要の変動および不確実性に対処するために必要とされます。
- リアルタイムの時間スケールと前日市場の時間スケールの両者に対応できる能力は**柔軟性**と呼ばれます。現在の多くの電力系統では、実際に必要とされるものよりもより多くの利用可能な柔軟性があります。しかし、大規模な風力・太陽光発電の導入率が見込まれる電力系統では、柔軟性の向上が重要になります。系統運用方法を変更することで、既存の設備からより多くの柔軟性を得ることができます(図3)。



下記のファクトシートも参照下さい。

No.2 「風力・太陽光発電大量導入時の需給調整」

風が吹かないときや太陽が照らないときはどうするの？

電力系統では、需要が高いときは十分な発電を予想・計画する必要があります。

- すべての発電所は故障する可能性があり、需要が高まる時間帯にそのような故障が起こると、深刻な結果をもたらしかねません。
- 風力・太陽光発電所は、一斉に故障することはありません。しかし、広い地域に分散している多くの風力・太陽光発電所からの出力を集約しても、需要の多い時間帯に風や太陽がないリスクがあります。
- 発電アデカシー(訳注: 事故などの不確実性を考慮しても十分な容量が確保できること)を計画する際に系統運用者が一般に使用する指標は**容量価値**です。これは、需要が多い時間帯に風力・太陽光発電が利用可能な確率として表されます。
- 従来型発電所の容量価値が80~95%であるに対し、風力発電の容量価値は風力発電所の定格容量の5~40%の範囲と、従来型発電所よりも小さくなっています。幅が広いのは、需要の多い時期に風が吹くタイミングが国やエリアによって異なるからです。太陽光発電の場合、ピーク需要が昼間にある国やエリアでは、容量価値が非常に高くなる可能性があります。
- 現時点では、需要の多い時間帯や風力・太陽光発電出力の乏しい時間帯には、他の電源が利用可能です。しかし風力・太陽光発電の導入率が更に高まると、他の電源が運用されなくなるかもしれません。その場合、これらの稀頻度の時間帯には、確実に発電が需要を満たすために、需要を制御したり、低資本コストかつ高運用コストの(ピーク)発電所を建設したり、貯蔵設備を設置したりといった対策が必要となります。

下記のファクトシートも参照下さい。

No.3 「風力・太陽光発電の容量価値」

風力・太陽光発電によってCO₂排出が増える？

風力・太陽光発電の主な価値は、化石燃料の消費やそれにより生じる二酸化炭素(CO₂)など排出量を減らすことです。

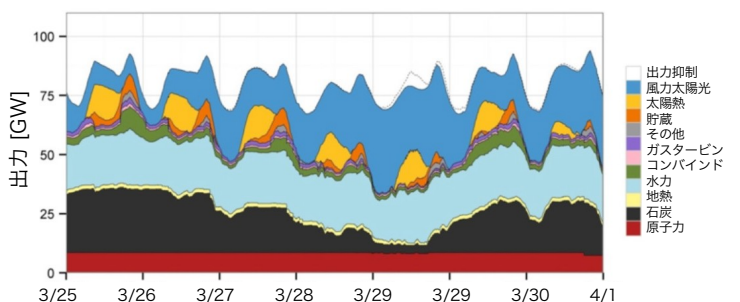
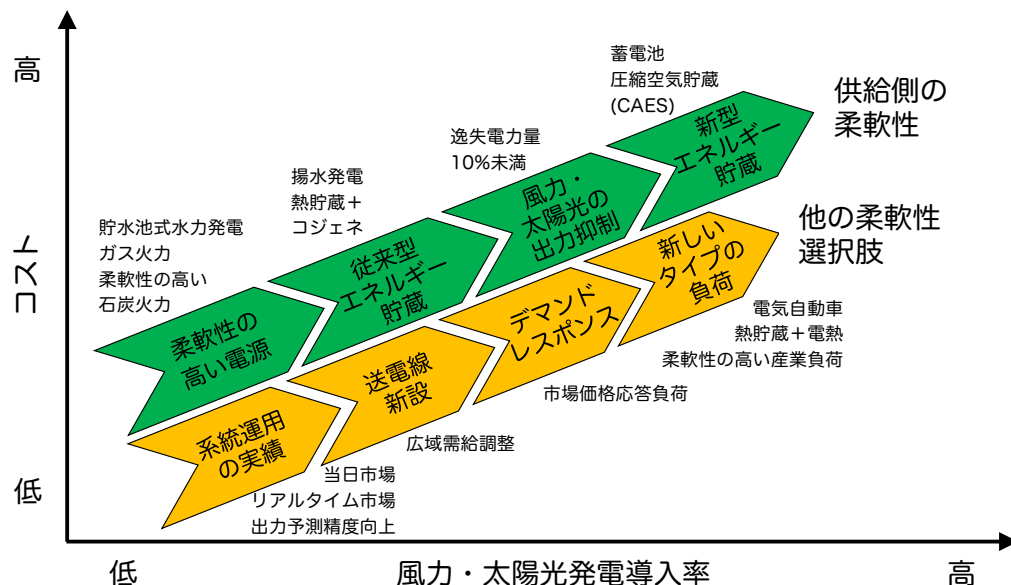


図2. 風力・太陽光の出力が多いと(右)、風力・太陽光が乏しい場合(左)と比較して、従来型電源、特に石炭(黒)とガス火力(緑)の一定出力の貢献度が変化する。これは、風力・太陽光の乏しい場合と風力・太陽光が豊富な場合との1週間にわたる米国西部系統のシミュレーション事例である。(出典: WWSIS, NREL)

図3. 電力システムの柔軟性向上の方法論（各選択肢の相対的順序は一例）



- 風力・太陽光発電で発電された発電電力量(MWh)の分だけ、化石燃料を消費する電源の運転の必要性が減り、残りの発電は風力・太陽光発電で供給されない需要分を供給するだけになります。
- 風力・太陽光発電の導入率が高い場合、化石燃料を消費する電源は、風力・太陽光発電の出力と需要の変動を補うために、起動・停止、急激な出力変化の頻度が多くなります。そのため、効率が低い状態での運用が必要になる場合があります。化石燃料を消費する電源の起動、出力変化、低効率運転は、定格運転に比べてCO₂排出量を増加させます。これらの電源を風力・太陽光発電の需給調整のために使うと、新たにCO₂排出量が発生することになります。
- 化石燃料由来の電源を風力・太陽光発電の需給調整のために使うことにより新たに発生するCO₂排出量は2%未満と推定されます。一部の電源の排出量が増加したとしても、風力・太陽光発電によって化石燃料を消費する電源を運用する必要性が減少した場合に全体的な排出量が減少する方が遥かに大きいものとなります(図4)。

下記のファクトシートも参照下さい。
No.5「風力発電がCO₂排出量に与える影響」

風力発電のためはどれくらい送電線の新規投資が必要？

風力発電のために新たな送電線への投資が必要となる場合がありますが、それは風力発電所の立地や既存システムの堅牢性や特性に依存します。

- 一般に、あらゆる新規の発電所は、既存の送電網に接続するために新たな送電(または配電)線を必要とします。また、新規の発電所から電力が増えることに対応するため、既存の送電線の増強も必要になる場合があります。
- 新しい風力発電所は、既存の送電網の電力の流れ(潮流)を変えることとなります。潮流方向が変化して、送電や配電網における損失が増加したり減少

したりする場合があります。風力発電によって、ボトルネックや送電混雑が増える場合も減る場合もあります。

- 大量の風力発電所を追加するには、通常、送電網への投資が必要ですが、増強された送電網は電力システム全体に便益をもたらします。したがって、送電コストは通常、特定の発電所や電源に割り当てることはありません(訳注: 通常、電源線は発電事業者が負担する)。
- 電力システム全体から見ると、送電が占める部分は消費者の電力料金のごく一部に過ぎません。多くの研究では、送電系統のコストを風力発電に割り当てたとしても妥当なコストが示されています。

太陽光発電については、一部の大規模な太陽光発電所を除き、配電系統で系統コストの増加が見られます。

下記のファクトシートも参照下さい。
No.8「風力発電と系統増強」

| | 再生可能エネルギーの増加による削減効果 | 需給調整の増加による増減 |
|-----------------|----------------------------|----------------|
| CO ₂ | 1.17~1.35億t 29% - 34% | 無視できる 🟡 |
| NO _x | 0.675~1.035億t 16% - 22% | 135~180万t ↓ |
| SO ₂ | 0.36~0.63億t 14% - 24% | 135~180万t ↑ |

図4. 変動性再生可能エネルギーに対応するために従来型電源の出力を増減することによるCO₂排出量の増加は、再生可能エネルギーの増加によるCO₂、NO_x、SO₂の全体的な削減量と比較して非常に小さい。(出典: WWSIS2, 2013)

風力・太陽光発電はブラックアウトを引き起こす？

現代社会において、ブラックアウトは莫大なコストが生じるため、電力系統は信頼度の高いものでなければなりません。

- 風力・太陽光発電の導入率が高くなると、電力系統のダイナミクス(動的挙動)に与える影響を評価することが重要になります。
- 電力系統は、さまざまな潮流の状況下で安定的でなければならぬだけでなく、系統事故や発電・需要の予期せぬ遮断などの場合でも安定的でなければなりません。
- アイルランドの研究によると、風力発電の出力が全需要の50%を超える時間帯には、信頼度を維持するために保護継電器(リレー)の設定を変更するなどの特別な対策が必要になることがわかっています。アイルランドは特殊なケースです。アイルランドは小規模な系統であり、系統に接続された大規模発電所が少ない(慣性が小さい)ため、全ての事象がより急峻に影響するからです。
- 大規模に連系された電力系統では、風力・太陽光発電がブラックアウトを引き起こす可能性は、小規模孤立系統よりも低くなります。
- 風力・太陽光発電所は、系統事故時に電圧や周波数を維持することが可能です。このような制御機能は重要であり、現在も進化し続けています。

下記のファクトシートも参照下さい。

No.6 「風力・太陽光発電の系統安定度への影響」

風力・太陽光発電を利用している国で得られた知見は、他国の電力系統にも適用できる？

シンプルな答としては、「ある程度は」です。

- 世界の電力系統は、電源構成、エリアごとに固有の需要の変動性、送電網の堅牢性、系統運用ルールや戦略に関して、それぞれ大きく異なっています。
- これまで積み重ねられた実務や研究の結果、風力・太陽光発電の導入率が低い場合には、いくつかの基本的な対策を行うことが適切であると結論づけられています。
 - 発電所の運転の意思決定に、風力・太陽光発電の出力予測を組み込むことが重要。
 - 系統運用者は、給電指令所で風力・太陽光発電所の出力をオンライン監視することが望ましい。
 - 風力・太陽光発電所の系統接続ルールに、十分な系統支援を要件とすることが望ましい。
- 風力・太陽光の導入率が高い場合は、関連する技術的な問題を理解するために「系統研究」を実施する必要があります。ほとんどの系統では、年間需要に対して導入率20%以上の風力・太陽光発電を系統連系するためには、送電計画・運用のための新しいツールが必要となります。

風力・太陽光発電の導入に限界はある？

2019年現在、デンマーク、アイルランド、ポルトガル、ドイツ、英国、スペインの6ヶ国では、総消費電力量に占める風力発電の導入率が高く、20%~50%となっています。多くの国で、風力・太陽光発電の意欲的な目標が見られています。

- 需要に対して風力・太陽光の瞬間導入率が高くなることは、技術的にも経済的にも実現可能であると考えられています。アイルランドでは、風力・太陽光発電のような非同期電源(訳注：火力や原子力のような同期発電機ではない電源)の出力の瞬間的比率を需要に対して75%まで可能にするための調査が進められています。デンマークとポルトガルはすでに1時間の間に100%以上の風力の比率を経験しており、近隣諸国への輸出によりこれを管理しています。
- 将来の脱炭素目標では、運輸、暖房、産業の電化(訳注：従来、化石燃料の燃焼に頼っていたものを再生エネ由来の電気に置き換えること)による新たな需要が見込まれています。また、このことによって、再生可能エネルギーによるエネルギーシステムに向けたエネルギー転換の新たな機会がもたらされます。

下記のファクトシートおよび関連文献も参照下さい。

No.4 「電化(エレクトリフィケーション)」

ESIG Guide on Grid Reliability Under High Levels of Renewables <https://www.esig.energy/esig-101/>

参考文献

- Holttinen, H. et al. (2019) Design and operation of power systems with large amounts of wind power. Final summary report, IEA WIND Task 25, Phase four 2015–2017. <https://community.ieawind.org/task25/ourlibrary>
- Greening the Grid Fact sheets available at: <https://greeningthegrid.org/Grid-Integration-Toolkit>
- Milligan, M., et al. (2009) “Wind power myths debunked.” IEEE Power & Energy Magazine, vol. 7, 6, ss. 89–99. DOI: 10.1109/MPE.2009.934268 https://www.researchgate.net/publication/38289316_Preface_Wind_Power_Myths_Debunked
- International Energy Agency (2017) Getting wind and sun onto the grid. IEA, Paris, <https://www.iea.org/reports/getting-wind-and-solar-onto-the-grid>
- WWSIS Western Wind and Solar Integration Study 1-3 <https://www.nrel.gov/grid/wwsis.html>

ファクトシートについて

このファクトシートは、18ヶ国間の共同研究であるIEA Wind Task 25 (国際エネルギー機関風力エネルギー技術協力プログラム第25部会)の取り組みを基に作成されています。この部会の発足時のビジョンは、世界中の電力系統の中で経済的に実現可能な形で風力発電のシェアを増加するための情報を提供することでした。IEA Wind Task 25はその後、風力発電や太陽光発電が電力系統・エネルギーシステムに与える影響を分析・評価するための方法論を更に進展させることに注力しています。

本翻訳書は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「風力発電等技術研究開発/風力発電高度実用化研究開発/風車運用高度化技術研究開発」事業の一環として、IEA Wind国内委員会の承認のもと作成されたものです。翻訳: 京都大学特任教授 安田 陽

以下のウェブサイト(英語)も参照下さい。

<https://community.ieawind.org/task25>