



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・太陽光発電の系統安定度への影響

電力系統の中で風力発電や太陽光発電の系統連系が進むと、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ますます重要になってきます。ブラックアウトは社会にとって非常に大きな損失となるため、系統信頼度を非常に高いレベルで維持する必要があります。最新の技術を採用し、適切な計画を立て、妥当なインセンティブを与えれば、風力・太陽光発電所は系統擾乱時にも系統を支援することができるということが、各国の運用経験により明らかになっています。

電力系統の擾乱やブラックアウトはこれまでどのように管理されてきたのか？

系統運用者は、**系統安定度**を継続的にモニタリングし(図1)、擾乱(訳注：短時間の急峻な電圧・周波数変動)に対する堅牢性を維持しなければなりません。また発電所の突発的な故障や架空線の断線など、潜在的な不測の事態の影響を最小限に抑えるための戦略を立てておかなければなりません。

擾乱時の系統の応答は、1秒未満のタイムスケールで評価されることが望ましく、需要が高いか低いか、どの発電機が運転中か、また電力網の配置や構成に応じて、安定度に関する多くの問題に備える必要があります。

風力・太陽光発電は、系統安定度にどのような影響を与え、支援することができるか？

風力・太陽光発電それ自体は系統擾乱の原因となる可能性は低いでしょう。しかし、それらに関連した変動性と不確実性は、擾乱によって引き起こされる状況を更に複雑にする可能性があります。風力・太陽光発電所の応答を系統運用に適応させ支援することで、系統擾乱を緩和することができます。このような対応は、**グリッドコード**と呼ばれる系統接続ルールによって実施することができます。また、インセンティブが付与されたり、系統サービスを通じて対価を得ることも可能です。



安定: ボールが元の状態に自動的に戻る **不安定:** ボールが元の状態に自動的に戻らない

図 1. 安定システムと不安定システム
(出典: Kundur et al., 2004).

風力・太陽光発電による系統安定化の4つの主要なタイプを以下に示します。

- **電圧安定性(電圧維持):** 最新の風車や太陽光発電パネルは、適切に制御設計がされているならば、無効電力の出力を制御することで、ローカルな電圧を維持することができます。
- **過渡安定度:** 系統障害、例えば木の枝で架空線が短絡すると、大きな過電流が流れる可能性があります。今日の大規模な風力発電所や太陽光発電所は、こうした条件に「耐える」必要があります(訳注: 事故時運転継続機能(FRT)と呼ばれる)。更に、必要に応じて無効電流を注入し、ローカル電圧を支持することで、系統安定度を高めることができます。
- **定態安定度:** ある発電機同士または発電機群で、僅かな擾乱の後、数秒から数分の間、互いにゆっくりとした振動が発生することがあります。風力発電所や太陽光発電所は、そのような振動が発生したり直接の原因となる可能性は低いものの、風力・太陽光発電が出力することによって、振動を減衰させる能力を持つ運転中の従来型発電機の数や配置が変わる場合もあります。風力・太陽光発電所は、適切な制御によって振動の減衰を支援することができます。
- **周波数安定性:** 運転中の発電機が突然停止すると、系統周波数は直ちに下がり始めます。数秒以内に周波数を回復できないと、系統崩壊やブラックアウト(訳注: 系統内のすべての発電機が停止する最も過酷な停電)の危険性があります。周波数安定性の担保は、特に需要に対する風力・太陽光発電の瞬間的比率が50%を超えるような小規模系統では、より困難になる可能性があります。これは、大規模系統ではさほど問題にはなりません。最新の風車は、回転翼の質量があるために、蓄積された大きな回転エネルギーを有しています。適切な制御により、この蓄積されたエネルギーの一部を

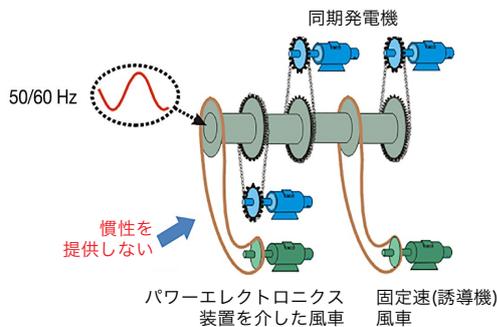


図2. 同期系統は、ほぼ一定の周波数(50または60Hz)で動作する。従来の発電機は、回転質量により慣性の維持を提供し、周波数を一定に保つ傾向がある。現代のほとんどの風車や太陽光発電所、蓄電池は、パワーエレクトロニクス機器を介して接続されており、原理的に慣性応答を提供しない。

一時的に解放して、高速な周波数応答を提供することができます。また、風力・および太陽光発電も、事前に適切に制御すれば、周波数安定性を向上させるための追加手段として、ガバナに似た応答(訳注: 水力発電のガバナ(調速機)のように自律的に変動を収束させる応答機能)を提供することができます。

最悪の事態が実際に起こり、擾乱が発生して系統全体がブラックアウトになった場合、系統を再起動するためには、ブラックスタート能力(訳注: 系統内のすべての発電機が停止し、1台目の発電機を自分自身で起動させること)を持つ発電機が必要になります。風力・太陽光発電は、これまでこのような役割を担っていませんでした。

系統安定度に貢献する風力・太陽光発電には、どのような課題がある？

風力・太陽光発電所は、数値解析、実証試験、および現実での実装において、適切に設計された系統安定度を向上させることが実証されています。これらの発電所は、周波数安定性を支援するための高速応答、定常状態や事故状態の間の電圧を維持するための無効電力応答、系統の振動を減衰させるための有効・無効電力の注入などを提供することができます。

風力・太陽光発電の導入率が十分に高くなり、風力・太陽光発電からの応答が必要とされるにつれ、このような能力の適用が増えています。いくつかの例としては、カナダのHydro Quebecエリア、米国テキサス州のERCOTエリア、アイルランドなどがあり、風力・太陽光発電は周波数・電圧維持サービスの提供に積極的に貢献しています。

いくつかの系統が炭素排出量ネットゼロに向けて移行していく中で、風力や太陽光といった再生可能エネルギーに基づいたパワーエレクトロニクス機器だけの運用(訳注: 従来型の回転機がないこと)に関心が高まっています。既存の風力・太陽光発電所は、これまでの従来型発電機によって「形成」されてきた系統に「追従」するように設計されています。したがって、100%再生可能エネルギーの系統では、いくつかの風力・太陽光発電所が「グリッドフォーミング(電力系統を形成する)」能力を持っている必要があり、活発に研究されている分野です(訳注: グリッドフォーミングコンバーターの開発などが知られる)。また、100%再生可能エネルギー系統では、一部の発電所がブラックスタート能力を持っている必要があります。

これもグリッドフォーミング能力、ローカルな電力貯蔵や電力網の配置に関する課題などの研究が活発に行われている分野です。

アイルランドの電力系統では、現在の安定性と将来の(潜在的な)安定性の問題が詳細に研究されています。アイルランドは、系統周波数の変化に抵抗する慣性を提供するための大きな回転質量が少ない小規模な単独系統です。したがって、たとえ風力発電がなかったとしても、周波数変化が急峻になります(図2)。2019年、アイルランドは特定の時間帯に最大84%の風力発電の瞬間導入率を経験しており、年間発電電力量導入率は約32%でした。2030年には再生可能エネルギーの導入率を70%にすることが目標とされており、これは風力・太陽光発電の瞬間導入率が非常に高い時間帯が更に多くなることを意味しています。将来的にこれらの高い導入率に到達するために、新しい系統支援サービス、既存の送電網の強化、高度な系統運用補助ツール、それぞれの発電所が有する特性のモニタリング強化、などの特別な措置が取られています。

参考文献

- ESIG Guide on Grid Reliability Under High Levels of Renewables <https://www.esig.energy/reports-briefs/>
- ESIG (2019). **Toward 100% Renewable Energy Pathways: Key Research Needs** <https://www.esig.energy/reports-briefs/>
- Flynn, D., et al. (2017). **Technical impacts of high penetration levels of wind power on power system stability**. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy & Environment, 6, e216.
- 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>
- Hodge, B.M., et al. (2020). **Toward 100% variable inverter-based renewable energy power systems**. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy & Environment
- Kundur, P., et al. (2004). **Definition and classification of power system stability**. IEEE Trans. PWRS, 19(3), 1387–1401.
- Miller, N., et al. (2014). **Western Wind and Solar Integration Study Phase 3 – Frequency Response and Transient Stability**. <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>

下記のファクトシートもご覧下さい。

- No.1 「風力・太陽光発電の系統連系」
- No.2 「風力・太陽光発電大量導入時の需給調整」
- No.8 「風力発電と系統増強」