

電力系統網の安定稼働に貢献する異常兆候検知

野村明裕*
Akihiro Nomura
佐子朋生*
Tomo Sako

Detection of Abnormality Signs that Contribute to Stable Operation of Power Grids

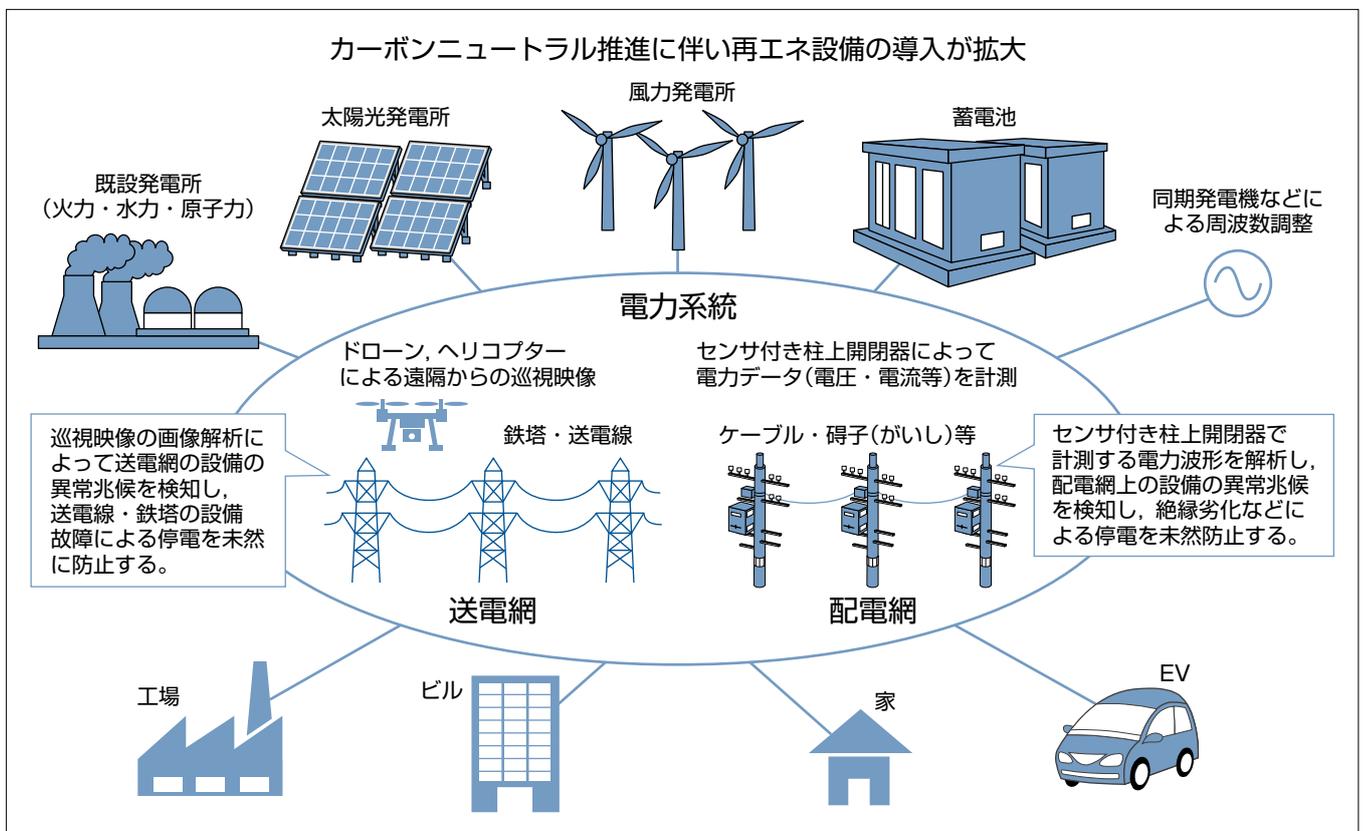
要旨

カーボンニュートラル実現に向けて太陽光発電、風力発電、蓄電池、EV(Electric Vehicle)等の再生可能エネルギー設備(以下、“再エネ設備”という。)の導入が様々な地域で進んでいる(太陽光発電は高圧送電線に近く日照量の多い平地、風力発電は一定の風速がある平地と山間部が多い)。再エネ設備を大量導入した後の系統を安定稼働させるためにはSVR(Step Voltage Regulator)、PCS(Power Conditioning System)や同期発電機の設備導入が必要である。この多種多様な設備増加に伴い停電につながる設備故障を防止することの重要性が高まっており、その解決策としてAIを活用した異常兆候検知技術を開発した。

設備故障の予兆はその破壊様相が小さいことからセンサ

で計測可能な変化は微小であるが、この異常兆候検知技術は配電系統の電圧・電流を監視することで絶縁劣化に伴う微小なパルス性電流を発見することや、ドローンの巡視映像から鉄塔・送電線のキズ、たわみなどの劣化を発見することなど、電力設備の異常兆候の検知が可能である。

AIは不確実性を含むその技術特性に起因する特有のリスクがあり品質保証の共通指針を確立する必要があった。三菱電機はAI製品の品質保証に関するAIプロダクト品質保証コンソーシアムに参画し、AIプロダクト品質保証ガイドラインを策定した。今回開発したAIを活用した異常兆候検知技術では、このガイドラインを適用し品質確保を進めた。



電力系統網の安定稼働を支える異常兆候検知技術

電力系統網の安定稼働を支える異常兆候検知技術は、系統制御システムの設備保全情報、センサ付きの柱上開閉器で得られる電力計測情報、ドローンなどによって得られる映像情報を基に、電力設備の異常兆候を検知し停電につながる設備故障を未然防止する技術である。将来的には故障時期を予測する予知保全の技術を追加し電力設備のCBM(Condition Based Maintenance)を実現していく。

1. ま え が き

近年、カーボンニュートラル実現に向けて太陽光発電や風力発電などの再エネ設備の導入拡大が進んでいるが、直流電源比率が増加すると擾乱(じょうらん)に弱くなるため電力系統の安定稼働の重要性が増している。一方で、日本の送配電設備は高度経済成長期の1960~1970年代に設置されたものが多く、高経年化に伴う不具合や事故の増加が懸念されており、効率的な建て替えや大規模の修繕が必要である。以上の背景を踏まえ、今後の電力保安レベルの維持・向上を実現するため、設備故障の予兆診断の技術開発が期待されている。

このような情勢を受け、当社は送配電設備に付加できるセンサ付き柱上開閉器で電圧・電流データを収集し、設備不具合の予兆を診断する技術(異常兆候検知技術)の開発に取り組んできた。この技術を活用すれば、電気設備の事故を予防し電力を安定供給することが可能になる。

この技術を開発するに当たりAIの品質保証の考え方を確立し実践していく必要があった。当社はAI製品の品質保証に関するAIプロダクト品質保証コンソーシアムに参画しており、そこで検討したガイドラインを当社向けに整理した。この異常兆候検知技術で適用したAIの開発にはそのガイドラインを活用し開発を進めた。

2. 波形解析技術

2.1 市場動向

再エネ設備の比率が増加すると、同期電源が持つ慣性力や同期化力が減少したり、電力系統に電気が逆潮流した場合に電圧が上昇し適正電圧範囲を逸脱したりする。そのため同期発電機などの周波数調整設備の追加や、自動電圧調整器(SVR)などによって逆潮流を検知し電圧上昇を抑えることが必要となる⁽¹⁾。

電力系統の安定稼働のためには、これら追加設備と高経年化する既存設備の保全が課題であり、経済産業省の“スマート保全アクションプラン”では再エネ設備異常の早期発見による稼働率の向上、設備異常箇所の事前把握による現場復旧作業の迅速化、災害後の迅速な健全性把握のための遠隔常時監視、絶縁劣化の常時監視等の高度な監視技術を導入していく必要があるとしている⁽²⁾。

当社はこのような電力設備保全に求められる異常兆候検知技術を開発しており、ドローンやヘリコプターによる巡視点検画像から劣化を検出して送電線・鉄塔の遠隔監視を可能にする技術や、センサ付き柱上開閉器の計測波形を解

析して異常予兆となる波形を検出し配電線の絶縁劣化などの常時監視を可能にする技術を開発している。次節以降では波形解析による異常兆候検知の当社技術について述べる。

2.2 波形解析技術を活用した配電線の異常兆候検知手法

配電線の事故(停電)時には、電圧・電流の異常な変動が発生する。その波及を防止するためFCB(Feeder Circuit Breaker)が作動する⁽³⁾。事故前には、予兆としてFCBが作動しないレベルの小さな電圧・電流変動(異常兆候)が発生しているが、変動が小さいことから異常箇所の破壊様相が小さく、目視の巡視点検によっても発見できないことがある。

この異常兆候の検出及び異常区間の特定ができれば、高度な経験が必要な広域の巡視点検作業を効率化し、非熟練保全員でも高水準の保安レベルを維持できる。さらに、経路切離し等によって事故(停電)を未然に防止できる。

異常兆候は事故要因ごとに特徴が異なり、例えば電力ケーブルに発生する異常は絶縁破壊に至る過程で微小なパルス性電流や超音波振動などを伴う部分放電が発生することが知られている⁽⁴⁾。この特徴的な異常波形を電圧・電流の立ち上がり、立ち下がりの特徴量から検出する手法や、ニューラルネットワークを用いた教師あり学習から検出する手法など、異常波形の特徴を記憶し合致するものを検出する手法がこれまで考案されている。詳細は2.3節に述べるが、当社は正常波形をベースに異常波形を検出する技術と過検知を除去する技術を持っており、他社に比べ検知できる波形(事故要因)のバリエーションとその精度が優れている。さらに、これを電圧・電流の通常と異なる機微な変化を検出することに特化させ、配電線の異常兆候検知技術を確立し、サンプル事故データによる異常兆候検出を確認した。

2.3 当社の波形解析技術

当社の波形解析技術はコンパクトかつ高精度でありセンサ付き柱上開閉器とセンターの両方に搭載可能である。配電線近傍のセンサ付き柱上開閉器ではリアルタイムで計測する電圧・電流測定データによって事故の予兆を推論する。センターでは学習を行う。具体的には、センサ付き柱上開閉器から収集した大量なデータから、正常時の電圧・電流測定データの形状的な特徴を抽出し、学習済みモデルを作成する。学習済みモデルはセンサ付き柱上開閉器に配置され、推論時に利用する(図1)。

センサ付き柱上開閉器で行う推論では、単位区間ごとに電圧・電流測定データを切り出し、別の単位区間と比較して、通常時と類似の波形か稀(まれ)な波形かを判別している。これによって異常兆候を検知できる(図2)。

異常兆候の検知の最終的な結果は、データ入力、前処理、検知を行った後、検知結果の選定(過剰な検知の除去)を経て出力される(図3)。動作頻度が少ない設備による電圧・電流値の変動は、学習データのパターンが少ないため過剰に検知してしまうことが多い。そのため検知結果をチェックし過剰な検知を除去する機能を備えている。例えばSVR動作などに伴う電圧・電流値の変動を正常と判定するために、設備やシステム運用のノウハウ、統計分析手

法などを活用している。学習データの数が少ないパターンを自動で抽出し、6種類に分類した上で、その正常波形条件を記憶する。異常兆候を検知した場合には検知波形と正常波形条件を照合した結果に基づいて過剰な検知を除去し、配電線に異常があるか否かを判定する⁽⁵⁾。

2.4 AI製品の品質保証

この技術の開発課題にAIの品質保証の考え方の確立と実践があった。AIは精度が100%にはならないことなど不確実性を含む技術特性を持っており、AIが期待どおりの品質を果たすこと(信頼性)について適切な検証を行う必要があった。製品開発の構想時点ではAIについては信頼性評価の共通指針が確立されておらず、特に安全性が重要視される電力分野で導入が進まない大きな原因の一つとなっていた。

そこで、当社はAIプロダクト品質保証コンソーシアム(QA4AI)に参画し、そこで検討した“AIプロダクト品質保証ガイドライン”を当社向けに整理し、社内用の“AI品質保証ガイドライン”をまとめた。この配電線の異常兆候検知技術の製品化に当たってもこのガイドラインに従って開発を進めている。

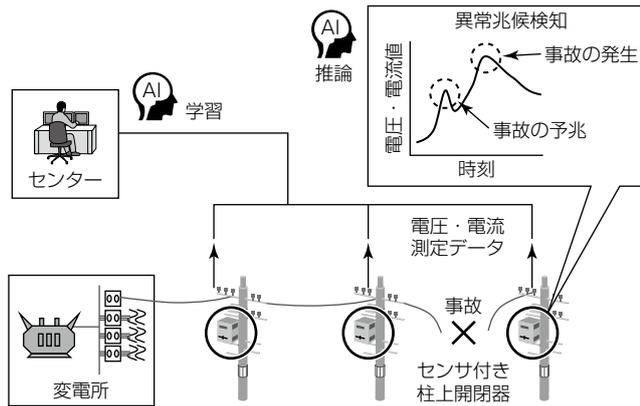


図1. 波形解析技術のイメージ

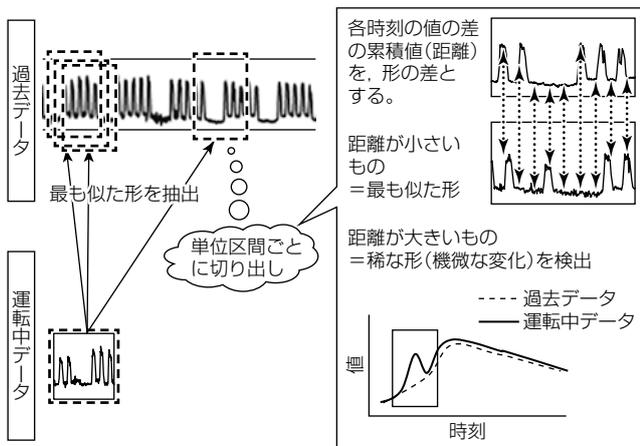


図2. 検知技術

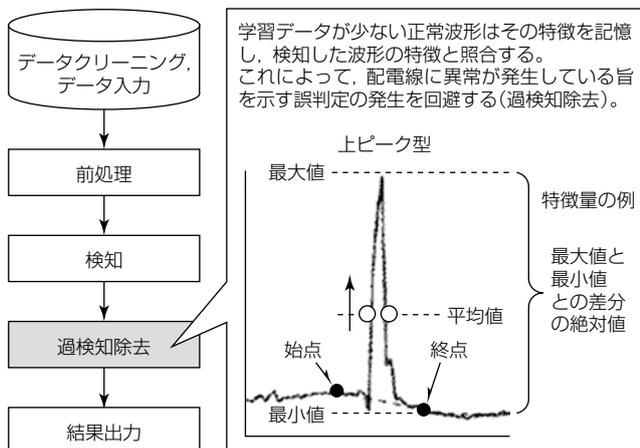


図3. 異常兆候検知フローと過検知除去技術

3. AIの品質保証に関するガイドライン

国内でAI品質保証のガイドライン化が進んでいる。品質保証の検討を進めている主な団体を表1に示す。

AIプロダクト品質保証コンソーシアム(QA4AI)によるガイドラインの特徴は表2に示すようにAIプロダクト品質保証のための五つの軸を提唱した点である。当社では、このガイドラインの項目を当社製品開発用に工夫を図った上で、確認フェーズを具体化した。

表1. AI製品の品質保証に関する団体

No	団体	ガイドライン	初出
1	AIプロダクト品質保証コンソーシアム(QA4AI)	AIプロダクト品質保証ガイドライン	2019/5/17
2	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	機械学習品質マネジメントガイドライン	2020/6/30
3	㈱三菱総合研究所・経済産業省・消防庁・厚生労働省	プラント保安分野AI信頼性評価ガイドライン	2020/11/17
4	SQuBOK策定部会	SQuBOK Guide V3	2020/11/19

表2. AIプロダクト品質保証のための五つの軸⁽⁶⁾

Data Integrity (データの完全性)	学習データの量が十分確保されていること
Model Robustness (モデル頑健性)	モデルの精度が高く頑健性が確保されていること
System Quality (システム品質)	システム全体での完成度が高いこと
Process Agility (プロセス機動性)	開発者が臨機応変に対応できる環境であること
Customer Expectation (顧客期待度)	精度・価値に対する顧客期待度に対しケアがなされていること

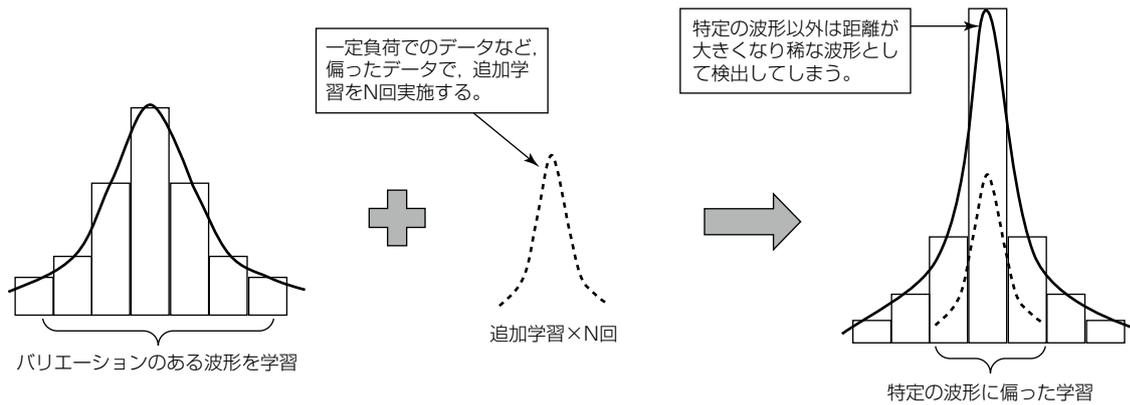


図4. 学習データの偏り

4. 運用結果・課題

この章ではAI品質保証ガイドラインの適用を通じて得た課題のうち、モデル頑健性に関する具体的な二つの課題について述べる。

4.1 モデルの陳腐化

AIを搭載したシステムの運用中は、学習済みモデルの性能が開発完了時に評価した性能から変化していないことを監視し続ける必要がある。一つ目は運用中のモデルの陳腐化(実データに対する予測品質の劣化)に関する課題である。

この技術を適用したシステムでは、運用中に最新データを追加・削除することで継続的にモデルを改善するための追加学習機能を備えており、ユーザー側による監視・評価を可能にしていた。この機能は運用前にユーザー評価を実施していたが、新しいシステムのためユーザーにはっきりした知識がない状態であり、システムの使用方法を正確に伝えることが難しかった。

この異常兆候検知技術は正常データを基に異常データを検出する仕組みであることから、異常に近い正常データから真に正常のデータまで、正常データのバリエーションを保たせる必要があるが、使い方によっては学習データに偏りが出てしまうという。ユーザーはデータが累積しさえすれば精度が上がると考えており、類似データを繰り返し追加学習させていた。学習データが偏ったことで、正常から少しでも外れたデータを異常兆候と判断するモデルとなった(図4)。

これについては次の2点の改善を実施した。

- ①ユーザーに仕組みが正しく伝わっていないことが問題であり、事前に使ってもらうなど仕様説明の方法を工夫する。

- ②学習データが偏らないようにする処理の追加及び見える化の対応を実施する。

4.2 データの取得、運用中のモデル切替え

学習済みモデルは数理的多様性、意味的多様性などを考慮し十分に多様なデータで検証を行う必要があり、二つ目はモデルの多様性評価に関する課題である。

送電線の異常兆候検知では当初はサンプルデータも少なく、一つのモデルで推論する方針であったが、数多くの電圧・電流測定データを分析すると系統の運用状態によって細かく変化していることが判明した。そのため精度を更に向上させるために複数の学習済みモデルを保持し、運用状態(一定のルール)によって動作を切り替えることにした。

5. むすび

本稿では、送配電設備保全に関する課題と当社の送配電設備の異常兆候検知技術について述べた。また、AIを利用した製品の品質保証プロセスと具体例について述べた。

異常兆候検知技術は、今後の再エネ設備の増加や人材不足の環境下での設備保安レベルの維持・向上に必要となる技術である。今後は、当社神戸地区に構築した実証実験施設や現地実証を通じてこの技術の効果の確認とより一層の高度化を進めていく。

参考文献

- (1) 経済産業省：同期電源の減少に起因する技術的課題 (2021)
- (2) 経済産業省：スマート保安アクションプラン (2021)
- (3) 電気協同研究会：配電自動化技術の高度化, 72, No.3 (2016)
- (4) 大久保 仁：高電界現象論, 281~282, オーム社 (2011)
- (5) 特許第6827608号
- (6) QA4AI AIプロダクト品質保証ガイドライン2021.09版