

オープンソースが不可欠： AI 導入による エネルギー トランジション

2025年1月

 **LF**ENERGY

目次

エグゼクティブ サマリー	3	エネルギー分野におけるオープンソース AI プロジェクトの優先ユースケース.....	18
はじめに.....	5	予測.....	19
LF Energy とは?	5	加速されたシミュレーションと最適化	21
オープンソースはエネルギー業界における AI の導入に 不可欠	6	資産管理	21
オープンソースによる協業とイノベーションは迅速な展開と 大規模な実装を可能にする	7	長期計画	22
オープンソースは AI アプリケーションにおける透明性と 信頼を促進する	9	AI アシスタント	23
オープンソースはプライバシー・サイバーセキュリティ・ 倫理的な保護策を強化する	11	グリッド インタラクティブ型スマート コミュニティと 需要側柔軟性.....	23
オープンなフレームワークは EU AI 法をはじめとする AI 規制の 遵守を支援する.....	12	AI のエネルギー分野での導入を加速するための 取り組み.....	24
オープンソースは才能を引き寄せ、育成し、集中させるのに 役立つ.....	13	デジタルツイン プラットフォーム	24
エネルギー関係者の AI 準備態勢	14	オープン データセット、合成データ、およびオープン ベンチマーク	25
データアクセスとガバナンスからデジタルツインまで	14	電力システムの基盤モデル	26
エネルギー分野における AI の革新にはオープンで現実的な データセットが必要	15	まとめ	28
オープンコモンズとインナーソース	15	謝辞	29
AI リテラシーとガバナンス.....	16	脚注	30

エクゼクティブ サマリー

世界のエネルギー分野は、脱炭素化、デジタル化、分散化による重要な変革を遂げつつあり、人工知能（AI）はエネルギーシステムの最適化を支える重要な要素として台頭しています。本ホワイトペーパーでは、エネルギー業界におけるAIの導入を加速し、その可能性を実現するために、オープンソースの革新が不可欠であることを示します。

オープンソースは電力システムにおけるAIソリューションの提供に不可欠

AIは、電力システムの変革を支援し、その運用を最適化する大きな可能性を秘めています。現在、電力システムはこれまでにない変化と課題に直面しています。しかし、これらの可能性を実現するためには、新たな協力モデルが必要です。

これは、AI分野においてオープンソースが主流となっている他の分野の経験や動向、そして電力システムへのAIの適用における課題を詳しく検討することで明らかになります。

- **スピードと規模**：ベンダーは、顧客が求めるAIソリューションを開発するために、公益事業者やシステム運用者だけでなく、研究機関や学術機関とも協力する必要があります。彼らは、公益事業者やシステム運用者からデータと電力システムの運用に関する専門知識へのアクセスを確保する必要があり、これらの組織はAIの革新を推進する上で主導的な役割を担わなければなりません。従来のコンソーシアム、秘密保持契約、クローズドなソリューションといった手法と比べて、オープンソースは、このようなデジタル協力を効果的に構築し、持続可能なビジネスモデルと収益を維持しながら規模を拡大する上で、はるかに優れています。

- **信頼性とコンプライアンス**：電力システムにおけるAIの重要な応用には、透明性が高く、安全で監査可能なモデルが求められます。公益事業者やシステム運用者は、これらのモデルを自ら運用・管理することが想定されます。また、データの大部分は、プライバシー保護や重要インフラ保護（Critical Infrastructure protection; CIP）に関する法律・規制を遵守するため、ファイアウォールの内側に留められることになります。オープンソースは、透明性・安全性・信頼性を促進することで、これらの要件や、EU AI法における「高リスクシステム」のようなAI規制への対応を効率化します。
- **標準化**：オープンソースのツールやコミュニティによる仕様策定は、標準化、相互運用性、データ交換をより迅速に推進することができます。これにより、AIの実現と導入が加速されます。

エネルギー業界が他の分野からのベストプラクティスを適用し、戦略的にオープンソースを活用しない場合、AIの約束と可能性を迅速かつ大規模に実現することはできません。オープンソースは、期待を現実に変える鍵となる手法です。

AI 準備フレームワーク

エネルギーの関係者は、AI の準備に対して戦略的なアプローチを採用する必要があります。

- AI の革新と導入を可能にするために、強固なデータ ガバナンスを確立すること
- AI の取り組みを支援するために、オープンソースの共有コンポーネントに基づいたデジタル ツインとデータ プラットフォームに投資すること
- サードパーティの革新者や研究者と共に AI モデルの開発を促進するために、オープンで現実的なデータセットを支援すること
- 組織や労働力における AI リテラシーを促進し、電力システムが AI ツールと技術を最大限に活用できるようにするとともに、AI の専門家がエネルギー特有の知識や課題を理解し、対応できるようサポートすること

LF Energy は主要な AI のユースケースに対応するオープンソースのソリューションを構築している

LF Energy は、電力システムにおける 6 つの優先的な AI 応用分野に向けて、プロジェクトを開始するか、または立ち上げようとしています。

- **予測** : 短期的な負荷予測の強化
- **加速されたシミュレーションと最適化** : シミュレーションおよび最適化ツールに AI を活用して、運用意思決定を迅速化すること
- **資産管理** : 予測分析を AI モデルで補完し、メンテナンスの最適化と故障の削減を図ること

- **長期計画** : 不確実性や気候変動に対応しながら、長期的なインフラ投資のための最適な意思決定ツールを開発すること
- **AI アシスタント** : 運用における AI 駆動の意思決定を支援すること
- **グリッド インタラクティブ型スマート コミュニティ** : グリッドのエッジで柔軟で分散型のエネルギー管理を可能にすること

その他のプロジェクトは、基盤モデル、デジタルツイン、合成スマートメーター データなどの横断的なニーズに焦点を当てています。

LF Energy はオープンソース AI のための主要な共同作業フレームワーク

Linux Foundation は、AI 分野における大規模で業界標準のオープンソース プロジェクトのための世界的なプラットフォームです。LF Energy は、この経験と知識を活かして、エネルギー分野のオープンソース AI イニシアチブを支援しています。私たちは、公益事業者、システム運用者、ベンダー、学術機関、研究所、その他の協力組織と連携し、彼らのオープンソース活動を拡大する準備ができています。

はじめに

このホワイトペーパーでは、エネルギーと技術の未来を形作る三つの主要なトレンドの交差について探求します。

- エネルギーシステムの脱炭素化に向けた世界的な取り組み
- 最近の AI 技術の普及
- すべての技術分野におけるオープンソースの実践の採用

これらのトレンドのそれぞれの組み合わせにおける相乗効果は明確ですが、すべてのトレンドを包括する議論は欠けていました。このホワイトペーパーは、そのギャップを解消することを目的としています。

このホワイトペーパーは、これらの変革的な変化を乗り越えるエネルギー関係者のためのガイドとなり、組織が AI 対応できるよう支援します。これらの組織は、AI の革新を促進するためにセンシティブなエネルギーデータを共有・管理することや、AI と電力システムの専門家との協力を促進すること、さらには、AI を重要なプロセスに導入する際の信頼性、安全性、説明責任を確保することなど、複雑な課題に直面しています。私たちは、オープンソースとオープン イノベーションの採用がこれらの障害を克服するための重要な要素となる方法を探ります。

エネルギー システムのための AI を成功裏に開発・導入するには、大規模な協力的取り組みが必要であり、それはオープンソースプロジェクトに基づいています。このホワイトペーパーでは、そのようなプロジェクトの優先分野を特定し、既存の取り組みを活用するか、必要に応じて新しい取り組みを立ち上げることで具体的なアクションを提案しています。

LF Energy とは？

[LF Energy](#) は、デジタル エネルギー転換を加速するためのオープンな産業グレードの技術プラットフォームとアジャイル仕様に関する共同作業のためのコミュニティです。LF Energy は、世界最大のオープンソースの管理者である Linux Foundation の一部であり、メンバー資金で運営されている非営利団体です。LF Energy は、30 以上のメンバーのサポートを受けて、約 35 のオープンソース プロジェクトのエコシステムを持っています。公益事業者、ベンダー、その他の団体が基盤となるデジタル技術と仕様について共同作業できる中立的な場を提供することにより、エネルギー業界は、生産準備が整ったソフトウェアで協力し、その持続可能性を数十年にわたって信頼できるようになります。

オープンソースはエネルギー業界における AI の導入に不可欠

AI は、自然言語の理解や創造的なコンテンツの生成など、複雑なタスクを機械が実行できるようにすることで、さまざまな業界を変革しています。オープンソース AI は、革新を推進し、最先端技術へのアクセスを民主化する強力な原動力として台頭しています。

例えば、Meta が開発した LLaMA は、自然言語処理を進化させる AI モデル群です。Meta が LLaMA モデルを研究目的で公開したことにより、世界的な AI 開発が加速しました。Hugging Face は、オープンソース AI の中心的なハブとして、モデル、データセット、ツールを提供し、協力と革新を促進しています。

Model Openness Framework¹ は、AI モデルが真にオープンであるための条件を、完全性とオープン性の観点から評価します。完全性とは、トレーニング データ、モデル パラメータ、評価手法などの重要な構成要素が利用可能であることを指します。オープン性とは、これらの構成要素が共有や変更を許可するライセンスの下で公開されていることを意味します。

オープンソース AI は、あらゆる分野や業界における協力を促進し、イノベーションを加速させます。オープンソース モデル

は AI 分野で主流となっており²、AI やデータに特有の利点を提供します。例えば、公平性（データセットやモデルのバイアスを検出・軽減する手法）、堅牢性（データセットやモデルの改変や不正を検出する手法）、説明可能性（特定の人物や役割が AI モデルの結果、意思決定、推奨を理解・解釈しやすくする手法）、来歴（データセットや AI モデルの出所を保証する手法）などがあります。さらに、オープンソースのデータ専用ライセンスにより、データが制約なく自由に利用できるようになり、オープンソースはデータの管理性（データやデータセットを整理、分類、タグ付け、管理するためのガバナンス構造やツール）にも貢献します。オープンソース モデルの特性により、業界や分野を問わず、基盤技術の協力が可能になります。

オープンソースが AI において果たす重要な役割は、エネルギー業界にも及びます。しかし、業界がこれまでにない変革の時代を迎える中で、エネルギー関係者は自らの特有の課題に注目しがちです。したがって、オープンソースとオープン イノベーションが、エネルギー分野における AI の導入と活用をどのように加速させるのかに焦点を当てるのが有益です。

オープンソースによる協力とイノベーションは迅速な展開と大規模な実装を可能にする

現在、エネルギーシステムは全体的かつ広範な変革を遂げています。その進行速度は国やシステムによって異なるものの、あらゆる場所で進行し、ほぼすべての要素、プロセス、規制に影響を及ぼしています。かつては、大規模な調整可能な発電ユニットから受動的なエンドユーザーへと、中央管理された送配電ネットワークを通じて電力が一方に流れていました。しかし、現在のシステムは、調整不可能な炭素フリーの分散型発電と、需要側における消費者中心の柔軟な技術を基盤としており、双方向の電力フローと電化の促進を通じて、エネルギー利用全体の脱炭素化を図っています。これらの分散型システムは、高度なセンサーや制御技術、デジタルエッジおよびIoTソリューションを活用し、さらにAIを導入することで、システムの複雑性と変動性に対応し、極端な状況下でも高い信頼性を維持しながら、全体のシステムコストを最適化し、電力の手頃な価格と公平なアクセスを確保しています。

これらの課題に対処するためには、イノベーションと協力が不可欠であり、それが経済的かつ公平な方法での迅速な展開と大規模な実装の鍵となります。すべての関係者が共通の課題に直面しているため、解決策を共に開発することが不可欠です。エネルギー業界はこれまでも、成功を収めるために共有されたイノベーションと協りに依存してきました。「史上最も複雑な機械」とも称される電力グリッドは、多くの人々の協力によって築かれた成果です。この大規模な変革の一環としてAIを開発・導入する今、その協力の重要性はこれまで以上に高まっています。

オープンソースは、デジタルおよびAIにおける現代的な協力のアプローチです。³

- 従来の協力プロジェクトがコンソーシアムに依存していたのに対し、オープンソースは、汎用的で十分に検証された知的財産およびガバナンスの枠組みを備えた、摩擦のないスケーラブルな協力体制を構築する方法です。
- オープンソースは、関係者やイノベーターが、仕様や標準に事前に合意することなく、ソフトウェアやAIモデルの実装に直接取り組むことを可能にします。これによりプロセスが加速するだけでなく、実装と並行して仕様や標準が組み込まれるため、実装の曖昧さが軽減され、誰もが一貫して利用・修正しやすくなります。
- 相互運用可能なシステムは、十分に文書化されたデータ標準やインターフェース、ベンチマークやテストケース、適合プログラム、そしてプロジェクト間の相互交流を通じて構築されます。
- 持続可能で将来性があり、普遍的なソリューションは、あらゆる関係者がソフトウェアやAIモデルへの修正を提案できることで構築されます。また、できるだけ多くのユーザーや貢献者を維持するために、一貫性のある高品質なソリューションの一部として、こうした提案を統合する強いインセンティブがあります。
- ベンダーやイノベーターは、共通の基盤となるソリューション上で協力し、その上に商用製品やサービスのエコシステムを構築することができます。
- 競争規制は、多くの公共企業や公共調達法および規制の対象となる公共事業者にとって重要であるため、遵守されています。オープンソースを通じて、公共事業者はベンダー

と協力することができ、将来の公共入札の機会を制限するリスクを避けることができます。一方、双方向の協力は、不公平な優位性を与えるように見えることがあります。

関係者は、ソフトウェアや AI モデルを自社開発する場合でも、ベンダーを通じて調達する場合でも、これらの利点を活用できます。最初の場合、関係者は開発やメンテナンスのコストを共有しながら、他者のイノベーションやユースケースの恩恵を受け、自分たちのニーズに合わせたソリューションを維持できます。次の場合、関係者はオープンソース プロジェクトに基づいたソリューションを指定でき、その場合、特定の実装を展開および維持するために必要な専門知識やインフラに直接投資することなく、オープンソース エコシステムのほとんどの恩恵を享受できます。いずれの場合でも、関係者は自分たちのビジネス戦略やニーズに従って、プロジェクトの進行方向や優先順位に影響を与えることができます。

規制当局や政策立案者にとって、オープンソースは分散化されたエネルギー業界における努力の採用と共同利用を支援し

ます。多くのエネルギー関係者は AI イノベーションに投資するリソースを持っていないか、たとえ持っていたとしても、膨大な努力の重複が生じ、コミュニティやビジネスにとって手頃な価格のエネルギーが重要な優先事項となる中で、料金や納税者の資金が無駄に使われることとなります。政府、大手電力会社、またはベンダーによる中央集権的な R&D イニシアティブは、すぐにはエンドユーザーの多様なニーズやユースケースに対応できず、相互運用性の問題を解決するために、競合する製品が生まれ、それにはより明確な標準や規制が必要となります。さらに、大規模なモデルや基盤モデルの場合、単独の組織がそれを構築することはできません。多様なデータ、電力システムの専門知識、AI の専門知識、コンピュータ リソースが大量に必要なからです。オープンソースとオープンイノベーションは、すべての関係者が自分たちの声やニーズを反映でき、大規模な企業が革新的な製品やソリューションを通じて投資を回収でき、サードパーティの革新者やスタートアップが繁栄できる魅力的な選択肢を提供します。AI に基づいたデジタルソリューションを開発する際、これは研究とイノベーションから市場と実装への最も効果的な道です。

オープンソースは AI アプリケーションにおける透明性と信頼を促進する

電力システムは、日常的な重要なアプリケーションから現代のグローバル経済を支えるまでの間で、私たちの現代生活にとって重要です。エネルギーシステムを変革した他の革新的な解決策と同様に、AI の導入は「電力供給を維持する」方法で行わなければなりません⁴。この成功は信頼性に依存しており、「電力会社による AI の導入における信頼性は、システムが信頼性とパフォーマンスを確保し、エネルギー転換の中で不安定性や進化するシステムの複雑さを背景に、利害関係者の信頼と透明性を促進する能力を指します。」

オープンソースとイノベーションは透明性を促進し、これは信頼とセキュリティの柱です。利害関係者や独立した組織はオープンソリューションを監査することができ、リスク、バイアス、脆弱性を明らかにし、共有されたイノベーションを通じてそれらを最小化することに貢献します。これは、保護から制御システム、運用に使用されるツールに至るリアルタイム AI アプリケーションにとって重要であるだけでなく、資産管理や長期的な計画調査などのリアルタイムでないアプリケーションにも広がります。

保護システムは、システムの安全で確実な運用を支えるものであり、オペレーターが介入するにはあまりにも迅速な時間スケール（通常は 1 秒未満）で動作する必要があります。プロプライエタリなブラックボックスと比較して、オープンソースの AI ソリューションは、あらゆるパラメータや運用条件にわ

たって認証を行いやすく、その挙動はより複雑な研究の一部としてモデル化しやすいです。

制御システムや自動化システムは、ローカルの測定値やパラメータに基づいて、さまざまな機器や保護システムの応答を最適化できます。これらは通常、保護システムよりも遅く動作しますが、それでも 1 秒から 1 分の間の時間スケールで動作するため、オペレーターが入力を処理し、関連する方法で反応するには速すぎるが多いです。このような自動化システムは、周波数や電圧の制御に使用されてきましたが、AI の適用によりさらに高度化します。かつて人間のオペレーターが直接グリッドを操作していた場所で、未来のオペレーターは、オートパイロットシステムを通じて飛行機を操縦するパイロットのように、グリッドを操作する自動システムを制御することになります。この考え方は、組織がホームやビル環境にインテリジェントな機器を導入する場合にも当てはまります。

この文脈では、透明性が非常に重要です。これにより、システムがどのように反応し、基盤となる保護システムやデバイスの挙動にどのように影響を与え、さまざまな条件やパラメータの下でどのように相互作用するかを理解することができるからです。透明性がなければ、オペレーターのアクションでは対処できない、従来の N-1 フレームワークよりもはるかに大規模なリスクが生じる可能性があります。保護システムと同様に、これらのシステムの挙動を大規模なシステム研究で正確に表現することが重要であり、忠実度と計算負荷の間に適切な妥協が必要です。これは、専門家が関連情報に透明にアクセスできる場合でも既に課題となっており、ブラックボックスを扱う場合にはほぼ考えられないことです。組織は、システムの挙動を詳細に理解しない限り、脆弱性やサイバー攻撃への露出を適切に評価したり対処したりすることができません。オー

オープンソース ソリューションがなければ、これは AI の導入に対する障壁となり、ステークホルダーはそのようなリスクを取ることを望まず、こうしたシステムの仕様を制限することになります。この層での AI アプリケーションはグリッドの近代化努力において重要な要素であるため、オープンソースはこの文脈で重要な推進力となります。

1 分未満の時間スケールで動作するシステムでは、オペレーターや人間の意思決定プロセスとの相互作用が重要になります。説明責任 (Explainability) は、AI の採用において重要な要素です。これは、交通や通信などの重要なインフラや意思決定を伴う他の業界分野にも共通しています。この分野は、AI の研究と革新が必要であり、学術および業界の専門家、社会学や認知科学、基盤となるシステムに関する専門知識が求められます。業界間でのオープンソースの協力は、特定の業界のニーズに対応しつつ、採用を加速するために不可欠です。エネルギーセクターはすでに運用プロセスにおいて最適化およびシミュレーションツールに大きく依存しており、オペレーターが新しいツールを採用するには慎重な設計と変更管理が常に求められてきました。オープンソース プロジェクトは、ベンダーとオペレーターが協力し、学術機関や研究機関の専門家を活用しながら、汎用的なソリューションを共同で開発できるようにします。また、組織間のデータ共有や適切なモデリングも必要となり、これまで困難であった問題です。オー

ンソースの協力やオープンデータ ライセンスの利用は、これらの障壁を克服するのに役立つでしょう。

これは、制御室外で使用される資産管理、システム計画、投資決定に関わるソフトウェアにも当てはまります。ここでは AI モデルの出力やその設計、トレーニングに疑問を投げかける時間がありますが、それでもこのソフトウェアは巨額の財務リスク、責任、またはリスクへの曝露に関わる意思決定を支援または通知する役割を担っています。そのため、この文脈で使用される AI モデル、それらのトレーニング データ、ハイパーパラメータ、およびバイアスを組織が理解していることが意思決定者にとって重要です。社内または独自のブラックボックス ソリューションと比較して、オープンソースは最良の妥協点です。オープンソースは、確立され広く採用された「最新技術」のツールを使用し、特定の戦略に基づいた実装を行いながら、そのソースコード、トレーニングデータ、パラメータへの透明で監査可能なアクセスを提供します。

同様の議論は、長期的なエネルギー政策や公共の議論をサポートする AI 駆動ツールにも当てはまります。規制当局や政策立案者は、オープンソースを活用して、専門的な調査や提言をすべてのステークホルダーがアクセスできるようにし、その結果、方法論、仮定を再現、監査、挑戦することができるようにすることができます。

オープンソースはプライバシー・サイバーセキュリティ・倫理的な保護策を強化する

オープン性と透明性により、ステークホルダーは AI モデルをプライバシー、サイバーセキュリティ、倫理的な観点から評価することができます。機械学習(ML)は学習と推論のためにデータを活用するため、エネルギー分野のアプリケーションでは、こうした懸念が一般的であり、業界での採用において重要となります。

エネルギー分野における詳細なデータセットやデータソースの多くには、何らかの形でプライバシーや機密性が関わっています。例えば、個人の行動や習慣が読み取れる可能性のあるメーターデータや、戦略的な事業情報、さらには知的財産や企業秘密を含む詳細なコンポーネントやシステムのモデルなどが挙げられます。オープンソースではコードが完全に透明であるため、一般の人々やセキュリティ専門家、ステークホルダーが、エネルギー関連の機密データ（顧客の使用パターンやインフラ情報など）を取り扱うアルゴリズムを確認・監査することが可能です。このような厳格な審査を通じて、AI がデータプライバシーの要件を遵守し、意図的または意図せずに機密情報を漏えいすることがないようにすることができます。

オープンソースプロジェクトは、多様な貢献者の協力を受ける

ことで、セキュリティ上の脆弱性を迅速に特定し、修正することができます。これにより、エネルギー分野で利用される AI システムを、データ漏えいやランサムウェア攻撃、システム的不正操作といった進化するサイバー脅威から保護することが可能になります。オープンソースの AI モデルやツールは、世界中のサイバーセキュリティ専門家による厳格なピアレビューを受けることができ、そのコードが脆弱性を持たないか監査されます。このようなコミュニティ主導の監査により、AI システムへの悪意あるコードやバックドアの導入を防ぐことができ、特にエネルギーインフラの保護において重要な役割を果たします。さらに、協力的なオープンソース プラットフォームでは、新たなサイバー脅威や対応策に関するリアルタイムの情報が共有されるため、エネルギー企業は潜在的なサイバーセキュリティ上の課題に先手を打つことができます。

オープンソースの AI モデルをバイアスや非倫理的な振る舞いについて精査することで、エネルギー分野における意思決定プロセスの説明責任を確保できます。モデルのアーキテクチャや学習データに完全にアクセスできるため、独立した研究者や監視機関が、送電管理やエネルギー配分などの AI アプリケーションにおけるバイアスや差別の有無を特定しやすくなります。オープンソース プロジェクトには、学术界、産業界、市民社会といった多様な分野の貢献者が関わることで、公平性、持続可能性、人権を重視した倫理的ガイドラインやベストプラクティスの策定につながる可能性があります。特に、社会全体に広範な影響を与えるエネルギーシステムにおいては、このような取り組みが極めて重要です。

オープンなフレームワークは EU AI 法をはじめとする AI 規制の遵守を支援する

2024 年半ばに制定された EU AI 法は、AI 規制に関する最初の包括的な枠組みの一つであり、EU 域内にとどまらず世界的に影響を及ぼすと考えられています。一般データ保護規則 (GDPR) が世界のプライバシー法の先駆けとなったように、AI 法も特に国境を越えて事業を展開するエネルギー業界において、AI の規制枠組みを形成していくことが期待されています。オープンソースの AI モデルは、さまざまな法域にまたがる規制に対応しなければならない企業にとって、基盤として活用できます。オープンソースを活用することで、エネルギー企業は将来的に EU 域外で導入される可能性のある新たな規制要件にも柔軟に適応しやすくなります。

AI 法はリスクベースのアプローチを採用しており、AI アプリケーションを禁止、高リスク、最小リスクのカテゴリに分類しています。エネルギー関連の AI モデルの多くは、送電網の管理やエネルギー配分の最適化など、重要インフラに関わるため、高リスクカテゴリに該当します。オープンソース モデルは柔軟性があり、開発者が各リスクレベルに応じたシステムを調整し、分類に適合する特定のコンプライアンス レイヤーを組み込むことができます。

高リスクのシステムについて、AI 法はリスク管理、データ ガバナンス、文書化、記録保持、透明性などの分野で厳格な要件を義務付けています。オープンソースの AI ツールは、リスク管理、データのセキュリティ、完全なトレーサビリティの確保のための自動化されたプロセスを統合することにより、エ

ネルギー企業がこれらの要件を満たすのに役立ちます。例えば、オープンソース プロジェクトでは、AI システムを継続的に監視し、リアルタイムでコンプライアンスの問題を警告するリスク評価ダッシュボードを開発することができます。

文書化、記録保持、透明性の点では、オープンソースの AI モデルには本質的な利点があります。コードが公開されているため、これらのシステムは自然に透明性を提供し、規制当局やステークホルダーがアルゴリズムを監査し、意思決定がどのように行われるかを理解できるようになります。また、オープンソースのフレームワークと統合できる自動文書化ツールも、エネルギー企業がシステムの意思決定を追跡し、AI 法のトレーサビリティと透明性に関する要件を遵守していることを確認するのに役立ちます。

オープンソース プロジェクトは、共通のコンプライアンス フレームワークで協力することができます。ここでは、開発者、業界のステークホルダー、規制当局と一緒に作業し、サイバーセキュリティ、データ ガバナンス、モデルの精度を管理するための標準化されたツールを作成します。これらのフレームワークは、グリッド管理や予知保全など、エネルギー分野の特定のユースケースに適応可能であり、高リスクシステムがコンプライアンスを満たすだけでなく、安全で堅牢であることも保証します。

コンプライアンス ツールのオープンで協力的な開発を強調することにより、オープンソース プラットフォームは、エネルギー企業が AI 法の要件に合致した AI システムをゼロから構築できるようにします。このアプローチは、コンプライアンスを容易にするだけでなく、コミュニティが新たな規制の変更やセキュリティ脅威に対応するための更新、パッチ、新機能を提供できるため、継続的な改善を促進します。

オープンソースは才能を引き寄せ、育成し、集中させるのに役立つ

AI の専門家は需要が高く、多くのエネルギー企業にとって、AI や機械学習 (ML) の専門家を見つけることは大きな課題となっています。複雑なエネルギーシステムに AI を適用するための急な学習曲線も、この問題をさらに複雑にしています。しかし、他の業界で開発された AI ソリューションを使用したり、エネルギー特有の課題を広範な AI/ML コミュニティに開放したりすることで、エネルギー企業は AI と ML の革新の波に乗ることができます。

オープンソースのアプローチは、独立した研究者、小規模な組織、大規模なユーティリティが協力できる AI とエネルギーの専門家のグローバルなエコシステムを構築するのに役立ちます。この協力的な環境は、イノベーションを促進し、エネ

ルギー分野の最も重要な課題、例えば、グリッド性能の最適化、再生可能エネルギーの統合、エネルギー効率の向上に対する問題解決を加速させます。小規模な組織にとっては、大規模なベンダーやユーティリティと共に働く機会は非常に価値があり、最先端のソリューションを提供しながら、多様なコミュニティの共有知識から恩恵を受けることができます。

このエコシステムの一員となることで、エネルギー企業は他者の貢献を活用し、独自の AI ソリューションを社内で開発するための時間とリソースを削減することができます。この広範な人材プールへのアクセスは戦略的価値を加え、急速に進化するエネルギー業界で競争力を維持するのに役立ちます。オープンソースの AI プロジェクトは、企業が課題を共有し、共同でソリューションを開発し、使用する AI システムが効果的であるだけでなく、新たに登場する規制や標準に準拠していることを保証するための協力のプラットフォームも提供します。



エネルギー関係者の AI 準備態勢

オープンソースがエネルギー分野における AI 導入の重要な推進力であることを示した後、次にエネルギー関係者への実践的なガイダンスに移ります。組織、特にあなたのような意思決定者や AI 推進者が、どのように AI を最大限に活用できるよう準備すべきでしょうか。

データアクセスとガバナンスの向上からデジタルツインの活用まで、AI の活用準備にはいくつかの戦略的なステップが必要です。エネルギー関係者であるあなたも、これらを検討しなければなりません。

データアクセスとガバナンスからデジタルツインまで

「データ」の環境を整えましょう：AI 時代において、データの品質、ガバナンス、デジタルツインへの投資はこれまで以上に重要です。

AI の可能性の核心にあるのはデータであり、特に高品質なデータを収集・管理・活用する能力が重要です。現在の AI、特に機械学習 (ML) の発展は、大量の関連データと、異なるデータソースを横断的に分析して新たな洞察を得たり、意思

決定を改善したりする能力に支えられています。AI の活用に向けた準備としては、データへのアクセス、ガバナンス、品質に関する長年の課題に取り組む必要があります。

AI アプリケーションには、データの量だけでなく質も求められます。エネルギー関係者は、分断されがちなエネルギーデータの特性に対応するため、強固なデータガバナンスの枠組みを優先的に確立する必要があります。これには、プライバシーやセキュリティ規制を遵守しつつ、運用データにリアルタイムでアクセスできる安全かつスケーラブルなプラットフォームへの投資が含まれます。効果的なデータガバナンスを実現することで、組織内のデータの流れが円滑になり、ボトルネックが解消され、意思決定の質が向上します。堅実なデータガバナンスプログラムとデータプラットフォームへの投資は、組織が AI を活用できる体制を整える上で不可欠です。

AI とエネルギー分野におけるデジタルツインの推進には強い相乗効果があります。デジタルツインとは、物理的なエネルギーシステムを仮想的に再現したモデルであり、AI モデルを支える豊富なリアルタイム データを提供します。AI とデジタルツインを統合することで、予測保全や状態に基づく保守、リアルタイム最適化、シナリオ プランニングが可能になります。ステークホルダーは、AI 戦略の一環としてデジタルツインの開発を推進すべきです。これにより、AI アルゴリズムの動的なテスト環境が提供され、運用データと実用的なインサイトのギャップを埋めることができます。

エネルギー分野における AI の革新にはオープンで現実的なデータセットが必要

データへのアクセスが AI の革新を促進します。現実的なオープンベンチマークでデータの障壁を打破しましょう。

エネルギー関連のデータは、効率的で信頼性の高いデータプラットフォームの構築にかかるコストだけでなく、基盤となるデータの機密性や敏感な性質により、関係者間や組織内で分断されています。これらの要件は、プライバシー法や重要インフラ保護 (CIP) 関連の法律・規制に基づくものであり、第三者とのデータ共有を明確に制限または禁止することがあります。多くの公益事業者も、データ漏えいや不正アクセスのリスクを最小限に抑えるために、機密データの社内共有を制限しています。

このような状況により、多くの革新者や研究者が実際のデータソースに容易にアクセスできず、たとえアクセスできたとしても、秘密保持契約 (NDA) やその他の制約の下で利用することが多いため、研究成果を公開してピアレビューを受けたり、オープンな共同研究を行ったりすることができません。これはイノベーションを大きく妨げ、コラボレーションの拡張性を制限します。このようなデータギャップのため、研究者はしばしば、小規模で単純化されたデータや古いデータに頼らざるを得ず、その結果、実際のユースケースへの適用可能性が制限されます。また、適切な特性を備えた標準的なベンチマークが確立されていないため、異なるアプローチを比較するこ

とも困難です。

この制約を回避するために、実データ、シミュレーションデータ、および実データから生成された合成データを組み合わせ、現実的なオープンデータセットの活用を推奨します。これらのデータセットには、実際のシステムの特長や特徴を組み込むことで、それを基に開発された技術や AI モデルが、実データに適用された際にも高い性能を発揮できるようにします。同時に、統計手法、モデリングツール、アルゴリズム、AI モデルを活用することで、機密情報やセンシティブな情報が露出するリスクを最小限に抑えます。

エネルギー業界のステークホルダーにとって、オープンで現実的なデータセットの構築への投資は、組織が直面している重要な課題や優先事項に基づいた強力な AI イノベーションエコシステムを引き寄せ、育成するための戦略的な動きです。このアプローチは、貴社を AI イノベーションのリーダーとして確立し、AI からのイノベーションを実際の実装と価値創造への移行速度を最大化することにも繋がります。

オープンコモンズとインナーソース

単独で車輪の再発明をしないでください。オープンソースを基盤にして AI スタックを構築しましょう。

エネルギー分野における AI の革新の多くは、すでに PyTorch、Jupyter、TensorFlow などのオープンソースリポジトリやツールを基盤として活用しています。ユーティリティやシステム運用者として、内部のデータサイエンティストや AI スペシャリストがこれらの最先端のライブラリを業務の一環として利用していることがわかるでしょうが、これはソフト

ウェア調達時におけるベンダーやイノベーション パートナーにも当てはまります。オープンソースに関与することで、両方のケースで内部を確認し、この重要なライブラリやツールのサプライチェーンを戦略的優先事項に基づいて確保する手助けができます。また、エネルギー アプリケーション向けに特別に開発されたモデルにも同様のアプローチを適用することは理にかなっており、大きなメリットをもたらします。この文脈では、オープンコモンズ プロジェクトの立ち上げは戦略的な投資となります。

エネルギー アプリケーションにおいて、AI モデルは専門化が必要ですが、共通の要素やパラメーター、取り組みには多くの共有可能な部分があります。これにより、努力の重複を避けるだけでなく、地域、イベント、システムや市場の設計を横断するより広範なパラメーターとコンテキストでモデルをトレーニングすることが可能になります。

組織内で、AI モデルやそのトレーニングおよび検証データ、ハイパー パラメーター、その他の文書をオープンに共有することは、開発の努力を共同化し、プロセスやツールの一貫性を生み出すのに役立ちます。このアプローチは「インナーソース」と呼ばれ、オープンソースが AI のコラボレーションにおける最良のアプローチであるのと同様に、非常に成功していることが証明されています。

オープンコモンズ、インナーソース、そしてコラボレーションへの戦略的投資が、AI を迅速かつ安全、持続可能で費用効果の高い方法で採用・展開するための鍵となります。

AI リテラシーとガバナンス

ツールボックスの新しいツール — オープンネスと透明性を通じて AI への信頼を築きましょう。

コラボレーションと技術は AI の準備にとって重要ですが、エネルギー関係者はこれらのイノベーションを支えるために、適切な内部文化とガバナンスの構築にも注力する必要があります。

AI を活用するために、エネルギー組織は従業員の AI リテラシーを育成する必要があります。これは、チームが AI ツールの仕組み、必要なデータ、および AI 駆動のインサイトの解釈方法を理解できるようにスキルを向上させることを意味します。関係者は、データサイエンティストから運用マネージャーまで、すべてのレベルでスタッフが AI システムと効果的にやり取りできるようにするための包括的なトレーニング プログラムをサポートすべきです。また、エネルギー分野の専門家と AI のスペシャリストとのクロス トレーニングも重要です。これは、コラボレーションを促進し、AI システムの価値を最大化するためです。多くの AI 専門家は電力システムを理解しておらず、ほとんどの電力システム専門家は AI の専門家ではありません。どちらも他の分野を習得するのが簡単だと思っているかもしれませんが、電力システムにおける AI イノベーションと導入の最も効果的な道は、両者の間で密接なコミュニケーションと対話を行うことです。オープンなコラボレーションとイノベーションは、このギャップを埋めるだけでなく、教育機関や学術機関が明日の労働力を準備するのに役立ちます。

データ文化は AI リテラシーとともにあります。AI の時代においては、最初は「何が」や「どのように」が明確でなくても、データが有用で価値のあるものであると認識することが重要です。AI 駆動型の組織は、データを整理し、アクセス可能な場所に置くことに焦点を当てた文化を促進することに投資します。これは、AI イノベーションと迅速な導入を促進し、高い投資収益率を得るための要件であり、組織の戦略的および経営レベルに至るまで AI リテラシーの一部です。

AI システムがエネルギー運用に統合される中で、確固たるガバナンスフレームワークが必要です。AI の導入は倫理的でなければならず、責任の所在、透明性、バイアスの軽減に関す

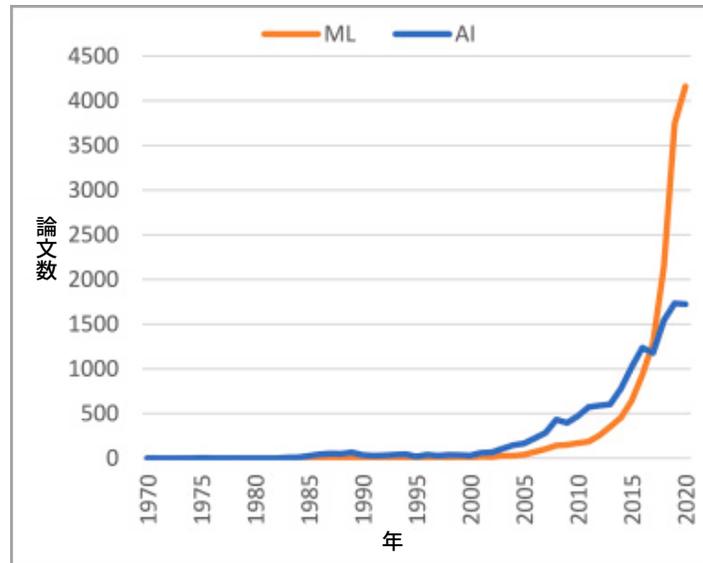
る明確なガイドラインが必要です。関係者は、E.U. AI 法などの規制に準拠し、セキュリティやプライバシーの懸念にも十分に配慮した形で、AI システムの責任ある使用を確保するガバナンス構造の確立を優先すべきです。オープンフレームワークは、そのようなガバナンス構造を設定するための優れたリソースとなります。

AI を運用にうまく統合したエネルギー関係者は、技術革新と強固なガバナンス、そして継続的な学習の文化を組み合わせた企業です。これらの分野に焦点を当てることで、組織は AI によって推進されるエネルギー転換の次の段階をリードするポジションに立つことができます。



エネルギー分野におけるオープンソース AI プロジェクトの優先ユースケース

エネルギー分野には多くの AI/ML アプリケーションの可能性があり、最近では他の多くの業界と同様に、この分野の研究開発とイノベーションが急増しています。例えば、Entezari ら⁵ は、エネルギー分野における AI および ML に関連する科学論文の数（1970 年～2020 年）を調査しました。

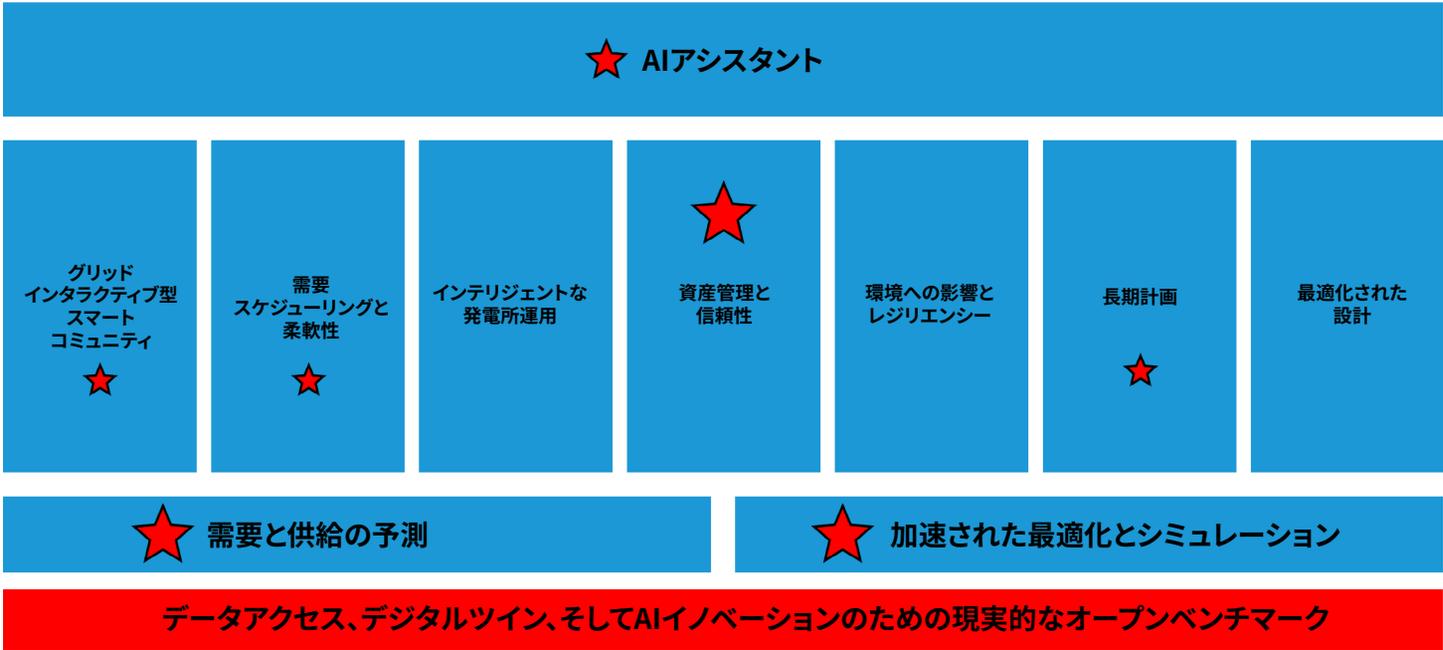


画像 copyright 2023; “*Artificial intelligence and machine learning in energy systems: A bibliographic perspective*”; Ashkan Entezari, Alireza Aslani, Rahim Zahedi, Younes Noorollahi; Energy Strategy Reviews (CC BY 4.0)

この分野は急速に進化していますが、最近いくつかの優れたレビュー記事が発表されています。例えば、Rolnick ら⁶ は気候変動に対する ML (機械学習) のアプローチをレビューし、約 900 件の論文を取り上げ、その多くが過去 10 年間のものです。他の論文では、Antonopoulos ら⁷ のように、エネルギー需要側の対応に関する AI および ML のアプローチをレビューしています。

これらの研究努力にもかかわらず、実際の産業での採用は比較的遅れており、その主な原因は前述の懸念、AI の準備不足、そして産業界と学術界の間で必要な協力関係を構築することの難しさにあります。AI および ML において、低い技術準備段階 (TRL)⁸ から高い TRL、そして実際の導入への移行には、オープンな協力とオープンソース プロジェクトが必要であり、最初からベスト プラクティスと業界グレードの焦点が支持されるべきです。LF Energy はこれを実現するための主要な組織です。

LF Energy を通じて、エネルギーのステークホルダーは協力し、業界グレードのオープンソース AI ソリューションを開発し、それらを支援し商業化するための豊かで持続可能なエコシステムを構築することができます。私たちのメンバーとともに、豊富な学術文献を参考として、エネルギー分野における最も有望な協力の領域としていくつかのユースケースを優先しています。



予測

予測は長い間、効果的なエネルギーグリッド管理の基盤となってきました。従来のエネルギー分野では、予測は主に電力需要の予測に関係していました。天候、時間帯、季節、特別なイベント、その他の変数が、予測される電力消費量を予測するために使用されました。この需要予測は、大規模な発電所の計画とスケジューリングの基礎となっていました。目標は、これらの発電所と送電・配電システムの能力と制約を考慮し、予測される需要に最適かつ信頼性の高い方法で対応することでした。

変動性があり制御できない分散型再生可能エネルギー源の統

合、需要側の柔軟性や分散型ストレージの登場、そして電気自動車などの新しいエネルギー利用の登場により、この予測プロセスはさらに複雑で重要になっています。天候は需要と供給に影響を与え、他の新旧の要因とともに、より多くの地域的影響を考慮する必要があります。例えば、都市部でのヒートアイランド現象は電力需要に影響を与え、慎重な評価が求められます。結果として生じる「純粋な」需要曲線（変動する需要から変動する供給を差し引いたもの）を十分な精度と信頼を持って予測することは、残りの制御可能な発電所、ストレージサイクル、負荷の柔軟性の計画とスケジューリング、および配電・送電網の制限や混雑を予測して対処するために不可欠です。供給と需要を超えて、一部のアプリケーションでは、供給と需要の予測の副産物として、または直接的な方法で価

格や CO2 排出量などの他のパラメータを予測することを目指しています。

予測アプリケーションは最終的な目的ではなく、関連する仮定、目標、およびリスク パラメータを伴った意思決定問題を情報提供する手段であることを認識することが重要です。したがって、一般的な使用として、コストや排出量の削減、制約の予測、極端なイベントからのリスク評価など、予測精度に焦点を当てるのではなく、情報提供を求める実際の意思決定問題から始めることが有益です。開発者は、最も影響を与える現象、その空間的および時間的な特徴、および不確実性が最終的な意思決定に与える影響に応じて、特定のエネルギー用途に合わせて基盤となる気象モデルを調整する必要があります。

学術文献では、需要、供給、またはその他のパラメータの予測に関する AI 手法が記録されており、産業界ではすでにそれらを実装しており、伝統的な手法と同様またはそれ以上のパフォーマンスを達成しています。予測は繰り返し行われる作業であり、入力データは一般的に利用可能です。これらは、歴史的なソースや気象モデルの出力から取得できます。その他のソース、たとえば画像や地理データベースは、太陽光パネルの設置状況などの関連するデータが直接利用できない場合に、追加の情報を提供することができます。

The OpenSTEF⁹ プロジェクトは、正確な短期負荷予測のための自動化されたオープンソースの ML パイプラインを提供しており、このようなユースケースにとって確固たる基盤を提供します。エネルギーの専門家によって開発され、オープンな業界開発プロセスの一環として常に改良されています。OpenSTEF の予測パイプラインは、測定された過去の電力網

データと、気象や市場価格などの関連外部予測因子を組み合わせており、ユーザーは任意の電力網における将来の負荷を予測できます。また、エネルギー消費、(再生可能) 発電、またはその両方の組み合わせを見ることができます。

OpenSTEF は、予測結果を API または (専門家向けの) グラフィカル ユーザー インターフェースを通じて出力します。全体の技術スタックはオープンソース技術とオープンスタンダードを活用しており、そのマイクロサービス アーキテクチャはクラウドネイティブの展開に最適化されています。Alliander は、これを用いて混雑管理や電力網の制限超過を防ぐために使用しています。しかし、OpenSTEF には他にもさまざまな用途があります。例えば、太陽光発電所がピークシェービングの予測に使用する場合などです。その他のユースケースとしては、契約遵守を促すために顧客を導くアグリゲーター、サービスとしての予測、または特定の市場での収益最大化を目的として実装するエネルギートレーダーが考えられます。

多くのオープンソースの予測ライブラリが研究コミュニティに存在しており、公共事業者は AI/ML 技術を試験的に導入し、それらを従来のソリューションと比較して評価しています。

OpenSTEF を基盤にして、関係者は AI/ML 技術の活用を進め、電力システムにおける予測を改善するために協力できます。LF Energy は、この目的に最適な環境です。前述のように、特定のユースケースに応じて汎用ツールを適応させることが必要であり、その際、最終的に通知しようとする決定や、対処しようとするリスクを考慮することが重要です。オープンソースはこれを効果的に実現し、各関係者が自分たちのニーズに合わせてフレームワークを貢献・修正できると同時に、協力とコミュニティの努力を活用することができます。

加速されたシミュレーションと最適化

エネルギーシステムの最適化とシミュレーションは、コンピュータの登場とともに重要な活動となりました。最適な配電と電力フローの問題は、運用と市場の中心にあり、非常に複雑な問題で、多くの連続的および整数的なパラメータ（混合整数プログラミング）を含んでおり、難解な非凸問題を生み出します。変動する再生可能エネルギー源や蓄電池の統合により、市場のクリアリングはより厳しくなり、リアルタイムに近い頻繁な実行が求められるようになり（そのため、実行可能な時間が少なくなります）、さらに詳細な地域の解析が求められるようになります。電力システムのシミュレーションも、主に新しいコンポーネントや制御が電力電子機器やデジタル制御アルゴリズムに基づいているため、より要求が高くなります。これらは、ステップバイステップの制御を伴う大規模で長期間の現象や、急速に反応するデバイスの両方を考慮する必要があります。

AI は、近似解やパラメータ推定を通じて、従来の最適化およびシミュレーションツールを高速化することで非常に効果的であることが証明されています。AI は、さまざまな予想される条件に基づいてオフラインで学習し、その後、この学習結果をオンラインで非常に迅速に引き出すことができるため、貴重な入力を提供します。

AI は、正確なシミュレーションが不要なサブシステムの挙動を近似する代理としても機能することができます。これにより、計算負荷の大きいシミュレーションを必要とせず、最も重要な特徴を保持できます。これは、関連する挙動を捉えきれない可能性のある非常に単純なモデルと、詳細なモデルやツ

ルを組み合わせることで共同シミュレーションを行うよりも手間のかかるアプローチとの間で、非常に効率的なトレードオフとなる場合があります。例えば、電力とガスシステムの相互作用や送電・配電網のシミュレーションが挙げられます。もし電力システムや送電の詳細なシミュレーションが重点であれば、ガスシステムや配電システムの代理を使用することは非常に効率的なアプローチとなるでしょう。

学術界や国家研究所では、AI を用いた最適化とシミュレーションの改善に関する多くの研究が行われており、この分野の研究成果は多く公開され、オープンリポジトリを通じて利用可能です。しかし、H. Khaloie ら¹⁰による記事に記載されているように、「有益な機械学習モデルから、セキュアで広く採用されるプラットフォームへの移行は、まだ歩いていない道である」とされています。LF Energy のプロジェクトは、業界の関係者を巻き込んだ適切な共同作業環境を提供することで、この道を開く可能性があります。標準化されたデータセットとテストベッドの提供は、特に解決すべき課題となっています。「レビューされた文献によれば、先行研究の大多数は、主にシミュレーション環境内で生成された合成データセットに依存しています。この合成データへの依存は、実世界のデータセットが不足していることに起因しています。」これは、LF Energy のプロジェクトが大きなメリットをもたらす領域でもあります。

資産管理

エネルギーシステムにおける信頼性とは、消費者の需要に応じて電力が安定的に供給されることを指します。信頼性の高いエネルギーシステムは、電圧や周波数といった重要なパラメータにおいて大きな中断や偏差がなく、安定的に電力やその他のエネルギー形態を供給します。脱炭素化が電化を促進

する中で、電力が私たちの生活や経済においてますます中心な役割を果たすようになるため、求められる信頼性はさらに高まると予想されます。これにより、資産管理や運用における追加的な課題が生じます。

エネルギーシステムの資産は長いライフサイクルを持ち、厳しい環境条件にさらされることがあります。特に西洋諸国では、現在のインフラの多くが長期間使用されており、その性能が継続して維持されることが重要です。これらのインフラが老朽化している中で、新しいインフラやアップグレードには時間がかかります。再生可能エネルギーの変動性や大規模な供給の相互利用が求められるため、インフラを限界に近づけて運用する必要があります。環境条件はリアルタイムで考慮する必要があり、無駄な制限を避け、クリーンなエネルギー源から最大限の出力を引き出すことが求められます。計画外の停電を最小限に抑え、メンテナンスや交換の最適化を行うことは、老朽化したインフラ、変動する負荷、限界のある状況では非常に困難です。システムが大きな変革を迎える中で、サプライチェーン管理もますます重要になっており、製造、原材料の採掘、輸送、設備の組み立てに必要なリソースがストレスを受け、供給不足や長時間の待機が生じることがあります。

AI は、過去の故障データ、センサーからの情報、および環境条件の測定値を活用し、分析するのに役立ちます。これにより、現在のシステムに関する情報を改善し、機器の性能に関する予測を行い、重大なコンポーネントの故障を予測し、メンテナンスを最適化できます。また、許容されるストレスレベル、余裕、リスクについてほぼリアルタイムで情報を提供し、

最適なメンテナンスおよび運用ポリシーやトレードオフを決定することができます。AI は、サプライチェーンのボトルネックや信頼性を維持・向上させるための最適な戦略に関する情報も提供できます。

この分野のオープンソース プロジェクトは、公共事業者、運営者、ベンダー、革新者が効率的なソリューションを構築するために協力することを可能にします。

長期計画

最適な長期計画戦略を決定することは、エネルギー分野において常に重要なプロセスでした。資産は高価で一般的に長寿命であるため、良い計画決定は、全体の分野において信頼性のあるエネルギー供給を手頃なコストで確保するために重要です。計画は、主に分散型の変動エネルギー源や長期の許認可プロセスにより、より複雑になっています。これにより、将来の供給はより不確実になり、送電および配電インフラの建設にはより多くの時間がかかります。

AI は不確実性に対処し、シナリオを生成し、解決策を提案するのに役立ちます。AI が活用できるデータは膨大ですが、難しさは全体的な方法論にあります。意思決定プロセスには多くの非技術的要素が影響を与えるからです。例えば、合成データ生成は、ML モデルを用いて条件付けされた将来のプロファイルを生成し、その後、電力フロー問題をシミュレートして、投資が必要になるタイミングを特定する形で、配電計画において使用¹¹されています。

AI アシスタント

再生可能エネルギーとプロシューマーによって電力網が進化する中、オペレーターは高い不確実性の下でリアルタイムの意思決定に直面しています。従来の複数の画面を使った監視システムは限界に達しており、業界¹²はAI駆動のハイパービジョンとヒューマン インザ ループインターフェースを模索しています。これにより、データを統合し、オペレーターのリアルタイムでの意思決定をサポートします。人間の専門知識とAIを組み合わせることで、オペレーターは重要な選択に対するコントロールを維持しつつ、日常的でデータ量の多いタスクをAIに任せ、状況認識と意思決定精度を向上させることができます。

オープンソースのフレームワークは、そのような適応可能で協力的なAIツールを構築するために理想的です。これにより、電力網のオペレーターは特定の運用ニーズに合わせてアルゴリズムやインターフェースを調整でき、研究者やエンジニアのコミュニティからの継続的な改善の恩恵を受けることができます。オープンソースは透明性も促進し、オペレーターがAIの推奨を理解し、信頼できるようにします。モデルを公開して開発・テストすることで、コミュニティはAIへの過度な依存などの潜在的な問題に対処し、電力網管理における人間の自律性と責任を支援する適応型システムを育むことができます。

グリッド インタラクティブ型 スマート コミュニティと需要側 柔軟性

グリッドエッジでは、AI駆動のデバイス、家電、制御システムがエネルギー使用の最適化、消費者のコスト削減、そしてシステムが厳しい状況で運用される際の柔軟性を促進するのに役立ちます。

そのようなアプリケーションには、相互運用性とシステム統合が重要となります。グリッド インタラクティブ型スマートコミュニティの構成要素は、ローカル情報や配電網およびシステムオペレーターからの信号に依存し、サイバーセキュリティおよびプライバシーの要件に対応する必要があります。

AIに直接焦点を当てているわけではありませんが、LF Energy Grid Edge Interoperability & Security Alliance (GEISA)¹³のようなオープンソースプロジェクトは、これらの要件を満たす相互運用可能なAI/MLソリューションの開発に役立ちます。

AI のエネルギー分野での導入を加速するための取り組み

上記のユースケース特化型プロジェクトに加えて、LF Energy は、より広範なアプリケーションでの AI 導入を促進するための水平的な取り組みも模索しています。

デジタルツイン プラットフォーム

デジタルツインは、AI を活用してグリッドの信頼性を向上させ、資産管理を最適化し、再生可能エネルギー源をシームレスに統合することによって、エネルギー分野を変革しています。これらの高度なデジタルモデルは、実際の物理システムを再現し、運用効率と戦略的計画の両方を改善するための AI 主導のインサイトを提供する動的なプラットフォームを提供します。

デジタルツインは、さまざまなデータストリームを集約することによって、AI 研究と展開のための強力なプラットフォームとして機能します。この能力は、複雑なグリッドの挙動を正確に分析し予測するために包括的なデータセットを必要とする AI モデルの開発において重要です。実際の条件をシミュレーションし、シナリオテストを可能にすることで、デジタルツインは、制御された現実的な条件下で AI アルゴリズムを訓練、テスト、改良するためのユニークな環境を提供します。欧州委員会の支援を受けた TwinEU プロジェクト¹⁴、ヨーロッパの電力インフラのデジタルツインを作成することを目指しており、大規模で複雑なシステムにおけるオープンソース手法の潜在能力と適用可能性を示しています¹⁵。

最近の IEEE PES テクニカルレポート¹⁶ は、ユーティリティ分野におけるデジタルツインの理解と展開のためのフレームワークを提供しています。このレポートは、デジタルツインの核心的な機能と考慮すべき点を概説しており、モデルのメンテナンス、シミュレーション エンジン、インタラクティブ ビジュアライゼーション、モデル検証といった分野に焦点を当てています。これらはすべて、AI が変革的な役割を果たすことができる重要な領域です。このレポートは、デジタルツインを AI 統合を効果的にサポートできるように構築する方法をフレーム化するのに役立ち、デジタルツインを使用して開発された AI アプリケーションが、さまざまなユーティリティの運用において実用的でスケーラブルであることを保証します。

デジタルツインの開発にオープンソースアプローチを採用することは、エネルギー分野における AI の革新を大幅に加速する可能性があります。オープンなコラボレーションにより、ユーティリティ、システムオペレーター、テクノロジーベンダー、イノベーターが開発成果を共有し、方法論を強化し、AI 技術をより迅速に導入することができます。この共同のアプローチは、技術的な進歩を加速するだけでなく、ソリューションが堅牢でスケーラブルであり、さまざまな運用コンテキストに適應できることを保証します。オープンソースはまた、実際の運用アプリケーションからソフトウェアコンポーネントをデジタルツインに再利用することを可能にし、開発の手間を削減し、現実世界とそのツインとの間でより一貫性を確保することができます。

TwinEU プロジェクトは、デジタルツインの開発におけるオープンソース コラボレーションの実施方法を示す優れた例です。

産業界と学術界からの多数のパートナーを集めた TwinEU は、ヨーロッパの電力システム デジタルツイン エコシステムの基盤を築いています。このプロジェクト内で開発されるすべてのコンポーネントはオープンソースであり、透明性、相互運用性、共同の革新を促進しています。例えば、TwinEU は LF Energy の PowSyBl¹⁷ および Dynawo¹⁸ プロジェクトから産業用グレードのソフトウェアを再利用しており、リソースを節約するとともに、運用使用例で既に検証されたソフトウェアコンポーネントを使用することで、デジタルツインの精度と信頼性を向上させています。このようなコラボレーションは、現代のエネルギーシステムの複雑さに取り組むために重要であり、技術の進歩を加速するオープンソース開発の実際的な利点を示しています。

LF Energy は、エネルギーシステムにおけるオープン イノベーションの促進にコミットしており、デジタルツインの開発を先駆けるための理想的なプラットフォームを提供しています。LF Energy は、グローバルなコラボレーションを促進することにより、データモデルとインターフェースの標準化を支援し、その傘下で開発されたデジタルツインが相互運用可能であり、業界の複雑なニーズを満たすことを保証できます。エネルギー分野のステークホルダーは、この取り組みに参加し、世界中のエネルギーシステムの未来を形作る技術の共同的な進歩に貢献すべきです。

オープン データセット、合成データ、およびオープン ベンチマーク

上記で強調したように、高品質でユースケース駆動型、かつ十分に文書化されたエネルギー データセットへのアクセスは、エネルギー業界における AI アプリケーションの重要な推進力となります。オープン データセットとベンチマークは、プ

ライバシーと商業的機密を尊重しながら、AI イノベーションを加速させ、規模を拡大するために重要です。

特に、研究者、モデル作成者、政策立案者は、需要と供給のリアルタイム最適化がますます求められるシステムの中で、エネルギー需要プロファイルがどのように変化しているかを理解する必要があります。現在のグローバルなエネルギー モデリングや政策決定は、依然として過去の静的で高度に集約されたデータに基づいています。過去には、エネルギーは一方に流れ、消費者のプロファイルは比較的予測可能で、発電は高度に制御可能でした。高度なメータリング インフラ (Advanced Metering Infrastructure; AMI) やスマートメーターを通じて、より良いデータが得られます。しかし、エネルギー消費データへのアクセスは制限されており、その大部分はプライバシー保護のために需要データへのアクセスが厳しく制限されていることが原因です。

OpenSynth¹⁹ プロジェクトは、この現実的なオープンベンチマークアプローチを示しています。これは、新しいグローバルなオープンコミュニティであり、合成データを民主化し、世界のエネルギーシステムの脱炭素化を加速することを目的としています。

OpenSynth は、スマートメーター データセットへの広範なグローバル アクセスを達成する最速の方法として、合成データ生成を活用しています。OpenSynth は、生のスマートメーターデータ (つまり需要データ) を保有する人々が合成データとモデルを生成し、共有するためのコミュニティを構築しており、また、研究者、業界の革新者、政策立案者が自信を持ってデータを使用できるように品質保証のためのコミュニティも提供しています。OpenSynth のパートナーである Centre for Net Zero は、何が「良い」合成スマートメーターデータを構成するのかを定義するための研究を行っています。MIT、オックスフォード大学、ジョージア工科大学の学者と提携して開

発表された「Defining ‘Good’: Evaluation Framework for Synthetic Smart Meter Data」では、合成データを活用する他の業界（金融サービスや医療など）で使用されている共通のフレームワークが、合成スマートメーター データにどのように適用できるかを調査しています。例えば、忠実度、ユーティリティ、プライバシーなどです。合成データの新興性を考慮すると、この種の研究はその広範な採用にとって重要です²⁰。

OpenSynth を通じて共有されるスマートメーター データは、合成アプローチに限定されず、物件の種類、エネルギー性能証明書、低炭素技術の所有状況（ヒートポンプ、電気自動車、バッテリーを含む）など、重要なメタデータも含まれます。これにより、メーターの背後にある変化をより良く理解し、異なる人口層に対する将来の需要プロファイルの開発に役立つ情報を提供します。

このアプローチは、電力ネットワークの特性や運用情報など、他の種類の機密データにも適用されます。これらはしばしば重要なインフラ保護の観点に関わるためです。LF Energy は、最適電力フロー、トポロジー最適化、または資産管理に関する研究とイノベーションのための現実的なオープン データセットに関する潜在的な取り組みを探求しています。

電力システムの基盤モデル

基盤モデルは AI の新たなフロンティアを代表し²¹、膨大なデータから学び、さまざまなタスクに適応するために自己教師あり学習を活用します。これらのモデルは、複雑なシステムから構造的な情報を自律的に抽出できるため、電力網のような動的で複雑なシステムに特に適しています。人類が構築

した中で最も複雑な機械の1つである電力網は、その複雑さを管理し、簡素化する能力を持つ基盤モデルの恩恵を大いに受けることができます。

LF Energy は最近、電力網のための基盤モデルの可能性を活用し、エネルギー転換と気候変動によって引き起こされる不確実性と複雑さに対応するために、GridFM²² プロジェクトを立ち上げました。このプロジェクトは、電力網専用に変化した堅牢な基盤モデルの開発に焦点を当てています。これらのモデルは、多様な電力網シナリオをカバーする大規模なデータセットを活用して事前学習され、特定の運用ニーズを満たすために微調整され、計算効率を向上させ、再生可能エネルギー源の統合を促進します。プロジェクトチームは、モデルのライフサイクルのさまざまなフェーズをサポートするためにモジュール型アーキテクチャを構築します。これには、合成データと実際の電力網データを使用した学習（プライバシー問題に対応するための連携学習を活用）から、運用使用のためのモデルの展開までが含まれます。GridFM は計算速度を数桁向上させ、より迅速で効率的な電力網の管理、計画、運用を促進する可能性があります。

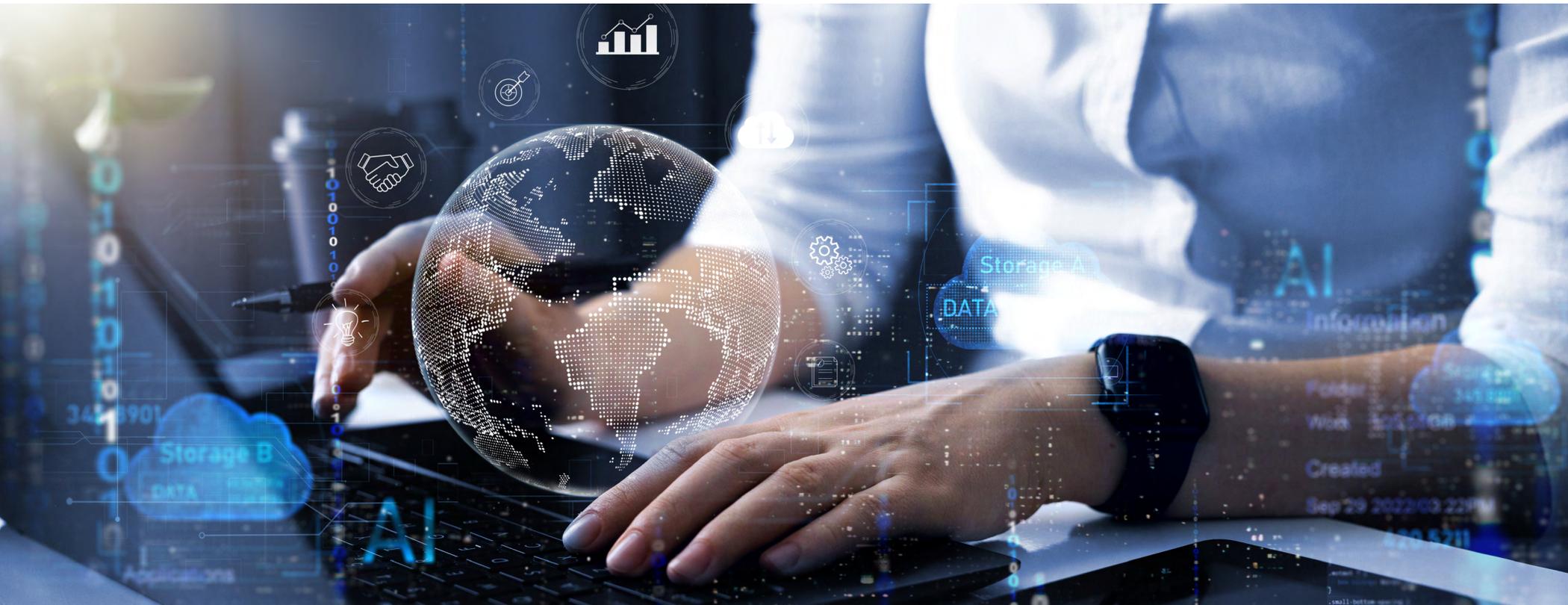
LF Energy の GridFM イニシアチブは、エネルギー分野の利害関係者がグローバルな共同環境を活用するための戦略的な機会を提供します。このプロジェクトは、電力会社、技術ベンダー、研究者、およびその他の業界参加者を結集し、電力網の管理を強化し、エネルギー転換を加速する基盤モデルの共同開発を進めています。

GridFM は、利害関係者が自らの能力を強化し、イノベーションを促進し、知識と影響力を拡大できるプラットフォームを提

供します。電力会社は、自社のデータを基盤モデルに安全に統合し、単独では得られない洞察を得ることができます。技術ベンダーは、堅牢なオープンソースの基盤モデルに基づいて商業的ソリューションを開発・洗練し、市場のニーズや規制基準に適合させることができます。学者や研究者は、エネルギーシステムの未来を形作る最先端の研究に貢献し、政策と実務の両方に影響を与えます。

GridFM プロジェクトに参加することで、参加者は世界クラ

スの研究開発エコシステムにアクセスし、AI やグリッド管理の分野での先端技術や専門家からの洞察を得ることができます。参加することにより、組織のニーズや視点がプロジェクトの方向性や成果に反映されます。さらに、利害関係者は GridFM への貢献や活用を通じて、経済的および運用上の効率を実現し、運用の最適化、コスト削減、エネルギー分野でのサービス提供の改善を図ることができます。



まとめ

オープンソースとオープン コラボレーションの採用は、単なる戦略的な優位性ではなく、急速に変革するエネルギー分野における必要不可欠な進化です。LF Energyはこの変革の最前線に立ち、AIを活用して世界のエネルギーシステムの脱炭素化を加速し、グリッド管理の向上を図る取り組みを推進しています。

これらの取り組みを進めるために、LF Energyはエネルギー分野におけるAIの役割を探求し、拡大することに特化した分科会(SIG)を設立しました。このSIGは、AIとエネルギーにおけるオープンソースプロジェクトやイニシアチブの機会を特定し、AI準備に関するベストプラクティスを共有することに重点を置いています。本ホワイトペーパーは、これまでのグループの活動の概要と今後のロードマップ、さらにそれらに付随する具体的なプロジェクトやアクションを提供します。

利害関係者は、知識、ツール、協力の機会に満ちた豊富なエコシステムを活用できます。この参加により、プロジェクトの

方向性や優先事項に直接影響を与え、特有の課題やニーズに対応できます。この共同の取り組みに参加する利点には、イノベーションサイクルの加速、開発コストの共有、そしてエネルギー分野に特化した最先端のAIアプリケーションへのアクセスが含まれます。

私たちは、すべてのエネルギー関係者の皆様にこの取り組みへの参加を呼びかけます。公益事業者、技術提供者、政策立案者、学術機関のいずれであっても、皆様の貢献は価値あるものです。共に協力することで、今日のエネルギー需要の課題に対応するだけでなく、より持続可能で効率的かつ強靭なエネルギーの未来を築くことができます。

LF Energyとそのメンバーと共に、オープンソースAIのエネルギー分野への統合を推進し、本ホワイトペーパーで示されたメリットを享受しながら、持続可能なエネルギーの未来に貢献しましょう。



謝辞

本ホワイトペーパーは、LF Energy の AI SIG における作業と議論の成果であり、LF Energy のエコシステム、AI、エネルギーシステム担当ディレクターである Alexandre Parisot の指揮のもとで作成されました。

次のメンバーの皆様には、貴重なご意見、コメント、および洞察を提供いただきましたことに深く感謝申し上げます : Gus Chadney、Sheng Chai、Boris Dolley、Virginie Dordonnat、Abder Elandaloussi、Mital Kanabar、David Lamers、Vincent Lefieux、Francois Miralles、Camille Pache、Pedro Vergara Barrios。

また、Lucian Balea および Alex Thornton には、多大なご支援とご協力をいただき、心より感謝申し上げます。信頼性に関するセクションは、Patrick Panciatici および Pascal Van Hentenryck との専門的な議論をもとに大きく発展しました。

脚注

- 1 <https://arxiv.org/abs/2403.13784>
- 2 Artificial Intelligence and Data in Open Source, I. Habbad, LF Research in partnership with LF AI & Data, March 2022
- 3 Alex Thornton, “Accelerating grid modernization with open technology and standards”<https://www.utilitydive.com/news/acceleratinggrid-modernization-with-open-technology-andstandards/735363>
- 4 D. Slate et al., Adoption of Artificial Intelligence by Electric Utilities, *Energy Law Journal*, Vol 45:1, 2024
- 5 Ashkan Entezari et al., Artificial intelligence and machine learning in energy systems: A bibliographic perspective, *Energy Strategy Reviews*, Volume 45, 2023, 101017, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X22002115>
- 6 David Rolnick et al., Tackling Climate Change with Machine Learning. *ACM Comput. Surv.* 55, 2, Article 42 (February 2023) <https://dl.acm.org/doi/full/10.1145/3485128>
- 7 Antonopoulos, Ioannis et al. “Artificial intelligence and machine learning approaches to energy demand-side response: A systematic review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 130 (September 2020): <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/130282>
- 8 Lavin, A., Gilligan-Lee, C.M., Visnjic, A. et al. Technology readiness levels for machine learning systems. *Nat Commun* 13, 6039 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33128-9>
- 9 <https://lfenergy.org/projects/openstef/>
- 10 Khaloie, H. et al. Review of Machine Learning Techniques for Optimal Power Flow (May 31, 2024). Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4681955> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4681955>
- 11 E. M. S. Duque et al. “Risk-Aware Operating Regions for PV-Rich Distribution Networks Considering Irradiance Variability,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 14, no. 4, pp. 2092-2108, Oct. 2023, [10.1109/TSTE.2023.3281890](https://doi.org/10.1109/TSTE.2023.3281890).
- 12 Antoine Marot at al. Towards an AI assistant for power grid operators, [arXiv:2012.02026](https://arxiv.org/abs/2012.02026)
- 13 <https://lfenergy.org/projects/geisa/>
- 14 <https://twineu.net/>
- 15 A. Monti et al. “Building a Digital Twin for European Energy Infrastructure: The role of open source”, *IEEE Electrification Magazine*, vol. 12, no. 3, pp. 78-84, Sept. 2024
- 16 Digital Twins for Electric Utilities: Definition, Considerations, and Applications, IEEE PES Technical report PES-TR 122, April 2024
- 17 <https://www.powsybl.org/>
- 18 <https://dynawo.github.io/>
- 19 <https://lfenergy.org/projects/opensynth/>
- 20 <https://arxiv.org/pdf/2407.11785>
- 21 H. Hamann et al. A Perspective on Foundation Models for the Electric Power Grid, *Joule*, 2024, ISSN 2542-4351, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.11.002>
- 22 <https://lfenergy.org/projects/gridfm/>



www.lfenergy.org



Copyright © 2025 [The Linux Foundation](https://www.linuxfoundation.org/)

このレポートは以下のライセンスで提供されています。
[Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International Public License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

この著作物を参照する場合は、次のように引用してください。
“Unlocking AI’s potential for the energy transition through open source,” The Linux Foundation, January 2025

この日本語文書は、上記レポートの参考訳として
The Linux Foundation Japan が提供するものです。
翻訳協力：小笠原徳彦

