

電力需給最適化の高度化に向けた取り組み

大山貴央*
Takahisa Oyama
森川史也*
Fumiya Morikawa

Efforts to Advance Optimization of Power Supply and Demand

*電力システム製作所

要旨

生成AIの普及に伴うデータセンターの大規模増設や再生可能エネルギー(以下、“再エネ”という。)の大量導入を背景に、電力の需給構造は大きな転換期を迎えている。需給調整市場の前日化や約定ブロックの細分化も進んで、電気事業者(以下、“事業者”という。)には複数市場を横断した高度な需給最適化が不可欠になった。三菱電機は、電力ICT(Information and Communication Technology)ソリューション“BLEnDer”シリーズを活用して、スポット市場・需給調整市場・時間前市場への入札計画での最適化課題を改善した。具体的には、火力発電機の起動停止・出力帯制約や蓄電池の充放電制約、調整力確保制約などを定式化し、電力量と調整力の同時最適化を実現した。併せて、商用ソルバー^(注1)やAI技術の活用による求解の高速化を推進している。

(注1) 与えられた条件や制約を満たす最適解や解を自動的に探索・計算するソフトウェアやアルゴリズムのこと

1. ま え が き

近年、国内の電力需要は構造的な変化の局面を迎えている。総合資源エネルギー調査会をはじめとする各種検討の場でも、生成AIの急速な普及に起因してデータセンター関連の電力需要が今後更に増加し、従来の需要想定を上回る可能性が繰り返し指摘されている⁽¹⁾。それに加えて、半導体工場の国内回帰や電気自動車(EV)の普及拡大も、中長期的な電力需要の押し上げ要因として注視されている。

一方、供給側では、2050年カーボンニュートラルの実現に向けた再エネの大量導入が進展している。2025年2月に閣議決定された第七次エネルギー基本計画では、2040年度の電源構成で再エネの比率を4～5割程度とする方針が示されており⁽²⁾、太陽光発電の累積導入量は80GWに達しつつある⁽³⁾。風力発電についても洋上風力を中心に大規模な開発計画が進行中である⁽⁴⁾。しかしながら、再エネの出力は天候に左右される変動電源であるため、その導入拡大に比例して電力の需給調整必要量も増大している。この調整力を確保するため、系統用蓄電池やVPP(Virtual Power Plant：仮想発電所)、DR(Demand Response)対応の需要家機器など、新たな電源リソースの導入が急速に進んでいる。

こうしたリソースの多様化は、事業者が管理すべき対象の増大と業務の複雑化を意味する。従来の火力発電所と揚水発電所を中心とした運用計画に加えて、蓄電池の充放電管理、VPPを構成する分散型リソースの統合制御、さらには複数市場への同時入札戦略の立案が求められるようになり、需給運用業務の範囲と難易度は飛躍的に拡大している。

1.1 市場制度の変革

制度面でも、電力市場は大きな変化の渦中にある。主に電力量(kWh)価値を扱うJEPX(日本卸電力取引所)に加えて、調整力(Δ kW)価値を扱う需給調整市場が2021年4月に“三次調整力②(GC(ゲートクローズ)までの再エネ予測誤差に対応する調整力)”の取引を開始し、以降段階的に商品ラインアップを拡充してきた。さらに2026年3月から、それまで週間市場かつ約定ブロックが3時間単位であった商品の取引スケジュールや入札時間単位が見直されて、全商品が前日市場、かつ約定ブロック30分単位になった。この制度変更は事業者にとって入札機会の増加と戦略的自由度の向上をもたらす一方で、意思決定の頻度と計算負荷を飛躍的に増大させた。

なお、需給運用業務は本来、年間の燃料調達計画から月間・週間の発電計画、翌々日計画、翌日計画、当日運用に至るまで多層的な時間軸で構成される。本稿では、このうち翌日計画以降の短期需給最適化、すなわちスポット市場・需給調整市場・時間前市場への入札計画の最適化を主な対象として述べる(表1)。具体的には、事業者は表1に示される市場を時系列に沿って横断的に活用する必要がある。どの市場にどれだけの電力量・調整力を配分するかは、市場価格の見通しや自社リソースの特性に依存する戦略的判断であり、事業収益を左右する重要な経営課題になっている。

表 1-前日・当日業務に関わる電力市場と役割

	市場	入札締切時刻	取引価値	役割
①	スポット市場	実需給前日10時	kWh価値	前日に作成した需給計画を基に電力を取引する。
②	需給調整市場	実需給前日14時	ΔkW価値	系統の安定運用に必要な調整力を一般送配電事業者に提供する。
③	時間前市場	実需給開始1時間前	kWh価値	スポット市場約定後に予実の差分を埋めるための電力を売買する。

1.2 市場制度変革に対応した当社の取組み

2016年4月の電力小売全面自由化以降、発電事業者・小売電気事業者間の競争が本格化し、アグリゲーターやVPP事業者など新たなプレーヤーも参入している。各事業者が保有・運用するリソースの構成は多種多様であり、従来の最適化手法では対応しきれない状況が生じている。

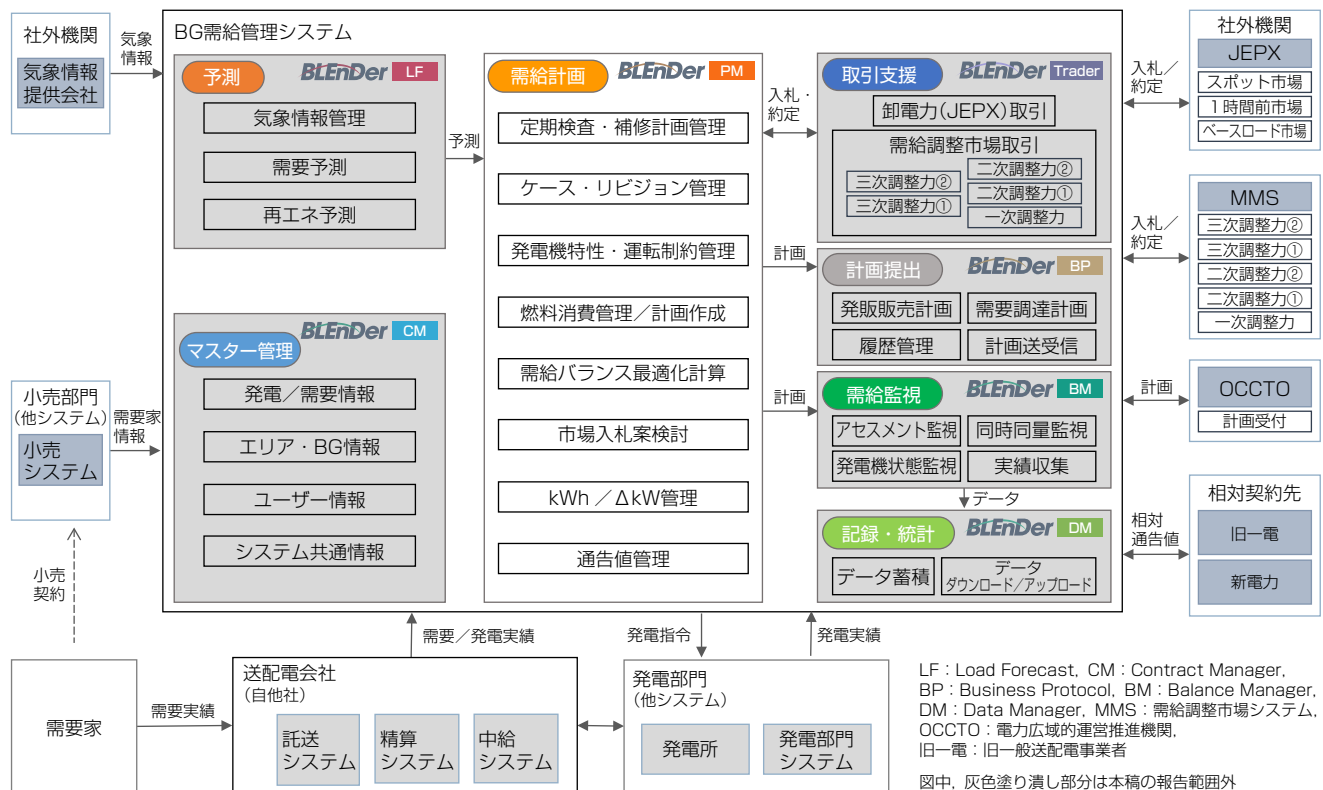
このような背景の下、当社は需給管理ソリューションとしてBLENderシリーズの機能拡充と、商用ソルバーやAI技術を活用した次世代の需給最適化基盤の開発に取り組んでいる。2章以降では、現行システムの概要と、今後対応すべき最適化課題、及びその解決に向けた技術的アプローチについて述べる。

2. 電力需給管理ソリューションBLENderの概要

当社は、電力自由化の進展に対応した需給管理ソリューションとしてBLENderシリーズを開発・提供している。

“BLENder BG(Balancing Group)パッケージ製品群”は、BG向けの需給管理システムである(図1)。需要予測から発電計画の策定、各市場への入札、計画値同時同量の管理、インバランスリスクの監視までを一貫して支援する。複数の発電所や需要家を束ねたBG全体の需給バランスを可視化し、経済的に最適な運用計画を立案する機能を備えている。

BLENder BGのうち“BLENder PM(Portfolio Manager)”は、主に発電事業者向けの需給計画システムである(図1)。火力・水力・揚水・再エネなど異なる特性を持つ複数電源の運用計画を統合的に最適化し、燃料調達計画や市場取引戦略と連動した短期から中長期の需給計画を支援する。



当社は20年以上にわたって本領域のドメイン知識を生かした独自の最適化手法の開発を進めて、事業者の需給運用業務を効果的に支援してきた。しかしながら、1章で述べたリソースの多様化、市場制度の複雑化といった環境変化によっ

て、最適化計算の問題規模は急速に拡大しており、従来の機能だけでは十分に対応しきれない領域が生じつつある。3章以降では、今後の需給最適化で考慮すべき制約条件と、その解決に向けた技術的取組みについて詳述する。

3. 需給最適化での制約条件の体系

需給計画の最適化問題は、多種多様な制約条件の下で目的関数(主に収益)を最大化する数理計画問題として定式化される。また、事業者ごとに保有リソースの構成が異なるため、制約条件の組合せや重み付けも多様である。このことが、特定の電源構成に依存しない汎用的な最適化エンジンの必要性を示唆している。

この章では、まず最適化の目標になる目的関数を示して、続いて主要な制約条件を平易な数式表現を用いて述べる。

3.1 目的関数

需給最適化の目的関数は、卸電力市場(スポット市場・時間前市場)、需給調整市場との取引で得られる収入と支出の差分から発電機のコストを差し引いた値で、次の数式で表される。

$$\begin{aligned} & \text{Maximize (演算対象時間内の収益)} \\ & = \sum_{t=1}^{t_{end}} (\text{卸電力市場収入}_t + \text{需給調整市場収入}_t - \text{燃料費}_t - \text{起動費}_t - \text{卸電力市場支出}_t) \end{aligned}$$

3.2 需給バランス制約

電力システムの安定運用の大前提として、次式のとおり、各時間帯で供給量と需要量が一致しなければならない。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{N_{gen}} \text{発電機出力}_i + \sum_{j=1}^{N_{pump}} \text{揚水発電機出力}_j + \sum_{k=1}^{N_{bat}} \text{蓄電池放電量}_k + \text{再エネ発電量(合算)} + \text{卸電力市場購入量} \\ & = \text{需要量} + \text{卸電力市場販売量} + \sum_{j=1}^{N_{pump}} \text{揚水発電機動力}_j + \sum_{k=1}^{N_{bat}} \text{蓄電池充電量}_k \end{aligned}$$

ここで、 N_{gen} は発電機数、 N_{pump} はこのうちの揚水発電機数、 N_{bat} は蓄電池数を表す。この制約は演算対象時間内の全ての時間帯(1日であれば、48コマ)で成立する必要がある。

3.3 火力発電の運転制約

火力発電機には、機械的・熱的な制約から複数の運転条件が課される。

(1) 出力上下限制約

各発電機は、機器の安全運転上、定められた最低出力以上かつ最大出力以下の範囲で運転しなければならない。

$$\text{最低出力} \leq \text{発電出力} \leq \text{最大出力}$$

(2) 出力帯(バンド)制約

各発電機は異なる複数の出力バンドを持ち、これらはそれぞれ燃焼効率などの運転特性が異なる。出力バンド間の遷移時は、一定時間発電出力を保持する運転制約が課される。

(3) 出力変化速度制約(ランプレート)

$$|\text{発電出力}_{i,t} - \text{発電出力}_{i,t-1}| \leq \text{最大変化速度}_i$$

(4) 最小運転時間・最小停止時間制約

$$\text{起動後の連続運転時間} \geq \text{最小運転時間}_i, \quad \text{停止後の連続停止時間} \geq \text{最小停止時間}_i$$

これらの制約は、発電機の起動停止計画と密接に関連し、整数変数(0/1)を含む混合整数計画問題としての定式化が必要になる。

3.4 揚水発電の貯水池制約

揚水発電所は、上部貯水池と下部貯水池の間で水を循環させることによって、電力の貯蔵と放出を行う。発電時の貯水池の容量には物理的な上下限があり、計画期間を通じて次の制約を満たす必要がある。

$$\text{最低貯水量} \leq \text{初期貯水量} + \sum_{i=1}^t (\text{揚水量}_i - \text{発電放水量}_i) \leq \text{最大貯水量}$$

また、計画期間の終端での貯水量を指定値に戻す終端水位制約や、複数の発電所が河川の上流・下流に連なる水系制約（カスケード制約）も考慮が必要である。

3.5 蓄電池の充放電制約

系統用蓄電池は、揚水発電と類似した充放電の制約を持つが、応答速度が速く調整力としての価値が高いため、次の制約を満たす必要がある。

$$\begin{aligned} \text{最小蓄電容量} &\leq \text{蓄電残量}_{i-1} + \text{充電量}_i \times \text{充電効率} - \text{放電量}_i \leq \text{最大蓄電容量} \\ \text{充電出力} &\leq \text{最大充電レート} \quad \text{放電出力} \leq \text{最大放電レート} \end{aligned}$$

蓄電池の劣化を考慮したサイクル数制約や、充放電効率の非線形性なども、精緻なモデル化では重要な要素になる。蓄電池はスポット市場でのアービトラージ（安価な時間帯に充電し、高価な時間帯に放電して売電する裁定取引）と、需給調整市場での調整力提供の双方に活用できるが、両者は同一の蓄電池容量を共有するため、どちらの用途にどれだけの容量を配分するかという戦略的判断が求められる。

3.6 調整力確保制約

需給調整市場への入札に当たっては、各時間帯に必要な調整力（上げ方向・下げ方向）を確保する次の制約が加わる。

$$\begin{aligned} \text{上げ調整力提供可能量}_i &\geq \text{必要上げ調整力}_i \\ \text{下げ調整力提供可能量}_i &\geq \text{必要下げ調整力}_i \end{aligned}$$

調整力の提供可能量は、各電源の運転状態と出力上下限の余裕（マージン）、出力の変化速度から決まるため、電力量の計画と調整力の確保は相互に影響し合う。例えば、ある火力発電機を最大出力で運転すれば電力量としての収益は最大化されるが、上げ方向の調整力余裕は0になる。逆に、出力を抑えて調整力を確保すれば、電力量としての収益機会を逸することになる。この電力量と調整力の同時最適化が、問題の複雑性を大きく増大させる要因の一つである。

4. フローネットワークモデルを活用した最適化手法

この章では、フローネットワークモデルを活用した最適化手法について述べる。

4.1 問題規模の課題

3章で述べた制約条件を統合し、電力量と調整力を同時に最適化しようとするすると、問題規模は急激に増大する。例えば、30分単位×48コマ×複数リソース×複数市場（スポット・需給調整・時間前）の組合せを考えると、変数の数は容易に数万～数十万のオーダーに達する。さらに、火力発電機の起動停止を表す整数変数が加わることで、混合整数計画問題としての計算困難性が一層増す。これらの課題に加えて、実運用では、スポット市場の入札締切りまでに最適解を得る必要があり、計算時間の制約は極めて厳しい。

4.2 フローネットワークによる出力バンドのモデル化

これらの課題に対して、当社ではフローネットワークの枠組みを活用した需給計画手法を開発している⁽⁵⁾。

需給調整市場の開設によって、火力発電機の出力バンドを考慮する重要性が高まっている。調整力を落札した場合、送配電事業者の指令に対して定められた応動時間以内に出力を調整する必要があるが、機器の制約上、出力バンドの切替え中は出力を一定時間保持しなければならず、調整力を発動できない。したがって、需給調整市場に入札する時間帯では出力バンドを切り替えない計画を立てる必要がある。

この手法では、従来手法と比較し、起動停止状態と出力バンドの遷移を別々のフローネットワークとして分離・結合する二重構造を構築することで、最適化問題の規模を大幅に縮小し、状態遷移の組合せ爆発を回避している。その結果、計画期間が1週間である比較的大規模な問題を実用的な時間内で解くことが可能になった⁽⁵⁾。

シミュレーション評価では、火力発電機3台を対象に週間需給計画を作成し、需給調整市場への入札を考慮することで、スポット市場への入札だけを考慮した場合と比較して収益が4.19%向上する結果を得た。また、需給調整市場へ入札する時間帯では出力バンドを切り替えない計画が得られて、送配電事業者からの調整力発動指令に確実に応じることができる計画の作成が可能であることが確認された⁽⁵⁾。この手法によって、事業者が電気のkWh価値（電力量）とΔkW価値（調整

力)を最適に組み合わせて収益を最大化するための計画立案を実現した。

4.3 部分問題分解と段階的最適化

全体問題を一括で解くことが計算時間の観点から困難な場合、問題を複数の部分問題に分解して逐次的又は並列的に求解する手法が有効である。例えば、まず、スポット市場向けの電力量計画を最適化し、その結果を前提条件として需給調整市場向けの調整力配分を最適化するという段階的アプローチが考えられる。

実際の市場運用でも、スポット市場の入札締切り後に需給調整市場の入札、さらにその後の時間前市場取引という時系列に沿った段階的な意思決定が求められる。この実運用の時間軸に沿った段階的最適化フレームワークの構築を進めている。各段階で前段の結果を引き継ぎつつ、残された自由度の中で追加的な収益機会を追求する仕組みを実現している。

ただし、段階的アプローチには、前段の意思決定が後段の最適性を制約するという本質的なトレードオフが存在する。このトレードオフを緩和するため、各段階間での情報のフィードバックや、後段の市場価格予測を前段の最適化に反映させるルックアヘッド手法の導入も検討している。

5. 商用ソルバーとAI技術の活用

この章では、商用ソルバーとAI技術の活用について述べる。

5.1 商用数値最適化ソルバーの活用

4章で述べたフローネットワークモデルや部分問題分解は、問題構造を生かした効率化手法として有効であるが、問題規模の更なる拡大や制約条件の複雑化に対応するためには、高性能な汎用数値最適化ソルバーの活用も重要な選択肢になる。

近年の商用ソルバー(Gurobi Optimizer, CPLEX^(注2)等)は、混合整数計画問題に対する求解性能が飛躍的に向上しており、数十万変数規模の問題を実用的な時間内で解くことが可能になりつつある。4章で述べたフローネットワークによる週間需給計画でも、Gurobi Optimizerを用いて約6.7万個の離散変数を含む大規模な混合整数計画問題を求解している⁽⁵⁾。当社では、これまで長年、独自に開発を進めてきた最適化技術を取り入れたBLEnDerシリーズとこれらの商用ソルバーを連携し、事業者ごとに異なるリソース構成や制約条件に柔軟に対応できる汎用的な最適化サービスの提供を目指している。

具体的には、事業者が持つリソースの情報と制約条件を入力として受け取って、適切な数値モデルを自動生成してソルバーに投入し、最適な運用計画を出力するフレームワークの開発を進めている。これによって、個別の事業者ごとにカスタマイズされた最適化ロジックの開発が不要になり、サービスの展開速度と保守性の向上が期待できる。

(注2) CPLEXは、International Business Machines Corporationの登録商標である。

5.2 AI技術の活用可能性

需給最適化の高度化で、AI技術の活用は、今後更に重要性を増すと考えられる。

現時点で特に有望と考えられるのは、需要予測・再エネ出力予測・市場価格予測といった予測領域でのAI活用である。需要・再エネ出力の予測精度向上は、調整力の必要量の見積り精度に直結し、ひいては最適化計算の入力データの品質向上につながる。また、市場価格の予測精度が向上すれば、スポット市場・需給調整市場・時間前市場への入札量の最適化がより精緻なものになる。

さらに、最適化計算そのものへのAI技術の適用も研究が進みつつある分野である。例えば、過去の最適化結果を学習することで良質な初期解を高速に生成する手法や、問題の特徴量から最適なソルバーパラメーターを自動選択する手法などが学術的に提案されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。これらの技術が実用レベルに達すれば、大規模な混合整数計画問題の求解時間を大幅に短縮できる可能性がある。

当社としても、予測技術と最適化技術を統合的に扱うことで需給運用全体の高度化を図るとともに、最適化計算の高度化に資するAI技術の研究動向を注視し、BLEnDerシリーズへの適用を検討していく。

5.3 市場間の戦略的配分と蓄電池運用の最適化

複数市場の並存は、事業者に新たな収益機会をもたらす一方で、市場間の配分戦略という従来にない意思決定課題を生じさせている。

蓄電池を例にとると、スポット市場でのアービトラージ、需給調整市場での調整力提供どちらの市場に参加するのが最経済となるかを考慮して、蓄電池の充放電を最適化する必要がある。この判断は、市場価格の不確実性の下で行われるため、確定的な最適化だけでなく、シナリオ分析やロバスト最適化の手法も有効になり得る。

火力発電機についても同様の課題がある。出力帯の余裕を調整力として需給調整市場に提供するか、その分の出力をスポット市場での販売に充てるかは、両市場の価格関係に依存する。4章で述べたフローネットワークモデルによるシミュレーション評価では、スポット市場価格と需給調整市場の価格差が小さくなる夜間から早朝の時間帯で、燃料費の高いLNG(Liquefied Natural Gas)発電機が需給調整市場に入札する傾向を確認した。また、スポット市場への入札量が多い時間帯では発電機の出力が大きくなるため、自然と下げ方向の調整力が確保できて、下げ調整力の入札量も増加する。このように、フローネットワークモデルはkWh価値とΔkW価値のトレードオフをネットワーク上のフロー配分として統一的に扱えるため、市場間配分の最適化に適した枠組みと言える。

時間前市場(ザラ場方式)については、スポット市場や需給調整市場の約定結果を踏まえた追加的な調整の場として位置付けられる。当日の需給状況や再エネ出力の実績値に基づいて、計画からの乖離(かいり)を時間前市場で補正する(単純な追加調達だけでなく、スポット市場断面で売り入札を行った同量を買い戻すといった戦略を含む)ことで、インバランスリスクの低減と追加的な収益機会の獲得を図ることができる。

6. む す び

電力自由化と再生可能エネルギーの大量導入によって、需給運用業務は複数市場を横断した高度な最適化を求められる時代に入った。約定ブロックの細分化、調整力市場の前日化、リソースの多様化といった環境変化は、最適化問題の規模と複雑性を飛躍的に増大させている。

当社は、BLEnDer BG・BLEnDer PMを基盤とした需給管理ソリューションの提供実績を生かしつつ、フローネットワークモデルによる出力バンドの効率的なモデル化と電力量・調整力の同時最適化、商用数値最適化ソルバーとの連携による汎用的な最適化基盤の構築、さらにはAI技術を活用した予測精度の向上に取り組んでいる。

今後は、市場価格の変動が事業収益に与える影響がますます大きくなることが予想される。将来的には、VaR(Value at Risk)等の金融リスク指標を最適化モデルに組み込んで、期待収益の最大化とリスクの抑制を同時に考慮したリスク考慮型最適化への発展も重要な検討課題である。

電力システムの安定供給と経済効率の両立という社会的要請に応えるため、当社は数値最適化技術とAI技術の融合による次世代の需給最適化ソリューションの実現に向けて、引き続き開発を推進していく。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省：総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会(第62回)GXに向けた取組と省エネ・非化石転換について(2024)
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2024/062/062_004.pdf
- (2) 経済産業省：第7次エネルギー基本計画(2025)
https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20250218_01.pdf
- (3) 公益財団法人 自然エネルギー財団：太陽光発電の動向(2026)
https://www.renewable-ei.org/pdfdownload/activities/REI_SolarIP_202601.pdf
- (4) 一般社団法人 日本風力発電協会(JWPA)：2024年12月末時点日本の風力発電の累積導入量～累積導入量は5,840.4MW(2,720基)～
<https://jwpa.jp/information/11062/>
- (5) 内藤健人、ほか：フローネットワークによる出力バンドのモデル化と需給調整市場を考慮した週間需給計画、電気学会誌, 142, No.12, 583～593(2022)
- (6) Masti, D., et al.: Learning binary warm starts for multiparametric mixed-integer quadratic programming, 18th European Control Conference (ECC), 1494～1499(2019)
- (7) Hosny, A., et al.: Automatic MILP solver configuration by learning problem similarities, Ann Oper Res 339, 909～936(2024)