

不確実性を考慮した気象予測情報に基づく 基幹系統運用のダイバーシティ評価

山崎 朋秀^{*, ****a)} 豊嶋 伊知郎^{**} 犬塚 直也^{***}
加藤 大樹^{****} 森 友輔^{****} 若尾 真治^{****}

Diversity evaluation for power system operation based on weather forecast information considering uncertainty

Tomohide Yamazaki^{*, ****a)}, Ichiro Toyoshima^{**}, Naoya Inuzuka^{***},
Daiki Kato^{****}, Yusuke Mori^{****}, Shinji Wakao^{****}

In recent years, a large scale of renewable energy (RE) such as photovoltaic (PV) power generation has been introduced to the power grid. As the output of RE fluctuates due to weather conditions, various difficulties occur in the operation of the power grid. One of them is grid congestion, in which transmission lines and transformers become overloaded. Thus the operation must be planned to avoid grid congestion based on the forecasted values of the RE output. However, the prediction of the RE output is usually accompanied by errors. Therefore, it is also important to operate the grid taking into account the uncertainty of the forecasted values. In addition, PV output has a strong correlation with solar radiation and it fluctuates depending on the amount of clouds in the atmosphere. Therefore, it is necessary to utilize meteorological forecast information. Recently, the Japan Meteorological Agency (JMA) has started to distribute the Meso-scale Ensemble Prediction System (MEPS) as weather forecast information that takes uncertainty into account. In this paper, we utilize the MEPS information to evaluate the diversity of grid operation by using optimal power flow considering the uncertainty.

キーワード：最適潮流計算，系統運用，不確実性，再生可能エネルギー，予測，気象予報

Keywords : Optimal power flow, Power system operation, Uncertainty, Renewable energy, Prediction, Weather forecast

a)Correspondence to: Tomohide Yamazaki. E-mail: yama-t-alliance@asagi.waseda.jp
東芝エネルギーシステムズ株式会社，*エネルギーシステム技術開発センター システム制御技術開発部，**府中工場 インフラサービス開発・設計部，***グリッド・ソリューション事業部 電力系統システム技術部
〒212-8585 神奈川県川崎市幸区堀川町 72 番地 34
*System Control Engineering R&D Dept., Energy Systems Research and Development Center, **Infrastructure Service Development & Design Department, Fuchu Operations, ***Power Grid System Solutions Engineering Dept., Grid Solution Div., Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation
72-34, Horikawa-cho, Saiwai-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa, 212-8585, Japan
**** 早稲田大学，先進理工学研究所
〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1
****School of Advanced Science and Engineering, Waseda University 3-4-1, Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan

1. はじめに

電力系統には発電機，調相設備，変圧器タップなどの様々な制御機器があり，電力の安定供給を維持するための様々な制約条件を満たしつつ，電力系統の運用費用が最小になるように各種機器を適切に運用することが必要である。各種制御機器を変数として，電圧や送電電力といった制約条件を満たし，最も経済的な電力系統の運用状態を決定する方法として最適潮流計算（OPF: Optimal Power Flow）と呼ばれる技術がある。OPF は様々な目的で用いられており，発電機の燃料費最小化，送電損失の最小化，環境性能最大化などを目的とする様々な問題設定が知られている^{(1), (2)}。本稿では燃料費が最小の発電機の運転状態を決定するような問題設定に取り組む。

さて、近年は太陽光発電（PV）などの再生可能エネルギー（再エネ）が電力系統に大量に連系されつつあり、第6次エネルギー基本計画によれば2030年度の野心的水準として103.5～117.6GWのPVの導入が見込まれている⁽³⁾。再エネ出力は天候に応じて出力が変動し、電力系統の運用に様々な困難が生じている。一例として、特定の送電線・変圧器が過負荷となる系統混雑が問題となっており、電力広域的運営推進機関の資料によれば2027年度に全国複数エリアの基幹系統・ローカル系統で系統混雑が発生する見込みと示されている⁽⁴⁾。系統混雑の課題は海外でも報告されており、系統混雑などの不測の事態にも備える OPF は Security constrained OPF と呼ばれ、多数の先行研究事例もある⁽⁵⁾。一方、再エネ出力の予測値に基づき系統混雑が発生しないように運用を計画することが求められるが、予測値には誤差が生じる。そこで、予測値の不確実性を考慮して系統を運用することも重要である。また太陽光発電出力は日射量と強い相関があり、日射量は大気中の雲量等により変動するため、気象予測情報の活用も必要である。

OPF に関する研究領域を Fig. 1 のように整理する。図中の1は再エネ予測値を活用した OPF に関する研究である。図中の2は物理モデルに基づく電力系統のエリア全体の気象予測情報を活用した OPF に関する研究である。図中の3は OPF において不確実性を考慮する研究である。

Fig. 1 の1～3の各研究領域を組み合わせた先行研究について、特に再エネ予測値を活用する1の領域周辺の事例について述べる。A の領域（1の領域を単独で検討）は過去に蓄積された再エネ出力ないし日射量から統計的に再エネ出力を予測して OPF の入力とする事例が多数報告されている。その多くは B の領域のように、A の領域に加えて不確実性を考慮する事例であり、再エネ不確実性範囲で最悪ケースに対応できる解を得るロバスト最適化を応用した OPF⁽⁶⁾などが提案されており、その他にも多くの事例がある^{(2), (7)}。統計的な予測値に基づく A・B の領域の研究事例では系統上の各点で独立した再エネ出力予測情報が存在する想定がなされることが多いが、隣接した地点の予測値は、空間的な連続性から相関を持つと考えるのが自然である。例えば PV 出力は日射量に応じて変動するが、近隣市町村間で連続的な厚い雲に覆われている場合には PV は低出力で類似し、快晴の場合には高出力で類似する。また、再エネの連系点は系統上の様々な点に分散しているが、各点での再エネの出力実績は必ずしも記録されておらず、履歴データ不足からモデルが構築できず、予測不在の「空地」ができてしまう場合がある。そこで、系統上の各地点間の再エネ出力の相関性（空間的な気象の連続性）を包含した平面的な粗密の少ない気象予測情報を直接的に OPF に取り込むことが必要と考える。

気象情報を活用した OPF に関する先行事例は少ないものの、C の領域のように再エネ予測と物理モデルに基づくエリア全体の気象予測情報を活用した事例として、後述する気象庁のメソ数値予報モデル GPV（MSM-GPV: Meso-Scale

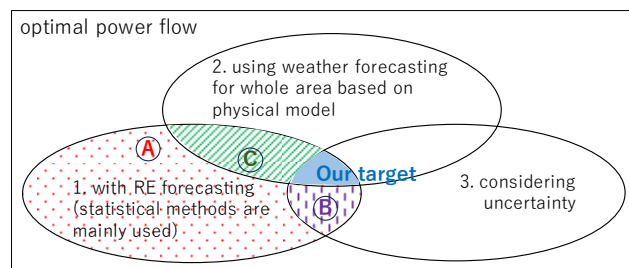


Fig. 1. Figure showing research areas related to OPF.

Model Grid Point Value) の情報を用いた事例がある⁽⁸⁾。これに対して、Fig. 1 の「Our target」が本稿の研究におけるターゲットである。不確実性を考慮した気象予測情報として、気象庁がメソアンサンブル予報モデル GPV（MEPS: Meso-scale Ensemble Prediction System）を2019年から配信しておりこれを活用する。MEPS の情報を OPF に取り入れて図中1～3の研究領域が重なる領域、すなわち再エネ予測、気象予測の各情報を活用し、かつ不確実性を考慮して基幹系統運用の多様性（ダイバーシティ）を評価する方法を提案する。我々の調査した限りでは MEPS を含め不確実性を考慮した気象情報を OPF に取り入れる研究の先行事例はなく、本稿では比較的研究領域に近い C の事例と比較検討しつつ、MEPS の情報を適切に活用する方法について述べる。

2. 気象予測情報

〈2・1〉数値予報 数値予報とは気象観測情報と物理モデルに基づく数値計算を用いて将来時刻における気象状態を予測する方法である^{(9), (10)}。物理モデルを用いる点が、回帰分析などの統計的予測による予報との相違点である。物理モデルは2個以上の離れた地点間での相互関係をモデル化しているため、これを活用することで複数地点の予測値を得ることができる。物理モデルは過去のある時点を初期値とする予報値（第一推定値と呼ぶ）と観測データから地図上の格子点の値を、客観解析と呼ばれる比較的規模の大きい繰返しシミュレーションにより推定する*。次に客観解析で求めた格子点上の値を初期値として、基礎方程式と呼ばれる微分方程式を数値計算で解いて将来予測を得る。数値予報は1959年に気象庁で初めて運用開始され、学術だけでなく産業応用でも広く活用されてきた。現在では様々な時間・空間粒度のメニューを選ぶことができる。数値予報の開発の歴史や種類については文献(11)が詳しい。次節以降では本研究に関連する MEPS および前史としての MSM-GPV について詳しく述べる。

*客観解析はデータサイエンス分野で「データ同化」と呼ばれる技術と同等である

〈2・2〉MSM-GPV MSM-GPV は日本周辺の領域について、5km 間隔の格子点ごとに最大 78 時間先まで 1 時間間隔で予報した数値予報データである^(1・2)。予報対象の変数の一部は海面更正気圧、地上気圧、風、気温、相対湿度、時間降水量、雲量、日射量である。MSM-GPV は 2001 年から気象庁により配信が始まり、先に格子点粒度が改良された(10km→5km)つづいて予報期間が現在の 78 時間に拡大された^(1・1)。気象情報を必要とする多くの産業で活用されており、現在も多くの改良が続いている^(1・3)。

〈2・3〉MEPS MEPS は、数値予報において不可避免的に発生する誤差に対処するため、開発された方式である^(1・4)。気象庁により予報が作成されており、2019 年から一般に配信されている^(1・5)。数値予報に限らず予報技術にとって、不確実性を完全に除去することができないことは経験的事実である。MEPS は不確実性を除去するのではなく従来の予報に付加することで、使用者側は不確実性リスクを低減するための手段を増やす。MEPS は MSM-GPV と同じ領域について約 5km のメッシュで、初期時刻（日本時間 3, 9, 15, 21 時）から 39 時間先まで 21 パターンの数値予報を作成・配信する。MEPS で配信される情報について、MSM-GPV と比較した結果を Table 1 に示す。気象庁では 1 時間間隔で計算されているが、配信されているデータの予報の時間間隔は 3 時間刻みである^(1・6)。配信されるデータは地上面については海面更正気圧、風、気温、積算降水量、日射量である。MEPS では、初期値作成時や積分の過程で摂動を与えることによって将来時刻に対して初期値から分岐した複数の予報値を算出する。Fig. 2 は MEPS の予報値のイメージの一例を示した図である。正式には 21 本であるが、簡単のため 5 本のみ記載している。図中の Initial value は客観解析で求めた初期値に相当する。客観解析は MSM-GPV, MEPS とともに同等の技術を用いている⁽⁹⁾。Initial value から開始した図中赤色の数値予報をコントロールランと呼ぶ。コントロールランの計算結果は MSM-GPV の予報値と一致する。各予報値の系列をメンバーと呼び、コントロールランはメンバー00 とも称する。各メンバー同士はインタラクションしない独立の情報であり、MEPS のメンバー情報が確率分布を意味しない点には留意する必要がある。従って Fig. 2 のイメージのようにメンバー00 は「平均値」にはならない。また値の離れたメンバーは統計的な意味での「外れ値」ではない。このことは従来の統計的対策を単純応用することを困難にしており、活用には新たな試みが必要である。そこで本稿では MEPS の情報を最適潮流計算に導入して基幹系統のダイバーシティを評価する新たな取り組みを提案する。

3. 不確実性を考慮した運用の評価方法

〈3・1〉評価方法の全体像 提案手法のフローチャートを Fig. 3 に示す。図中太字で示した S4 から S7 の処理は MEPS のメンバーの数、また、解析対象の時間コマの数だけ繰り返す処理であり、本稿で提案する解析方法において

Table 1. Comparison of MEPS and MSM-GPV.

Category	MEPS	MSM-GPV
Mesh	5km	5km
Initial time (JST)	3,9,15,21	0,3,6,9,12,15,18,21
Time interval of forecast	3 hours	1 hour
Max. forecast time	39 hours	39 hours or 78 hours
Number of members	21	1

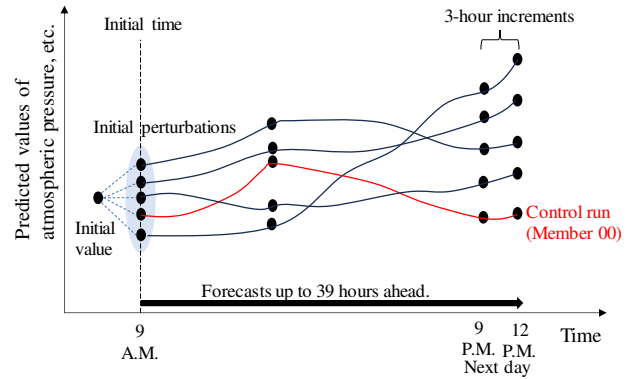


Fig. 2. Summary of forecast values by MEPS.

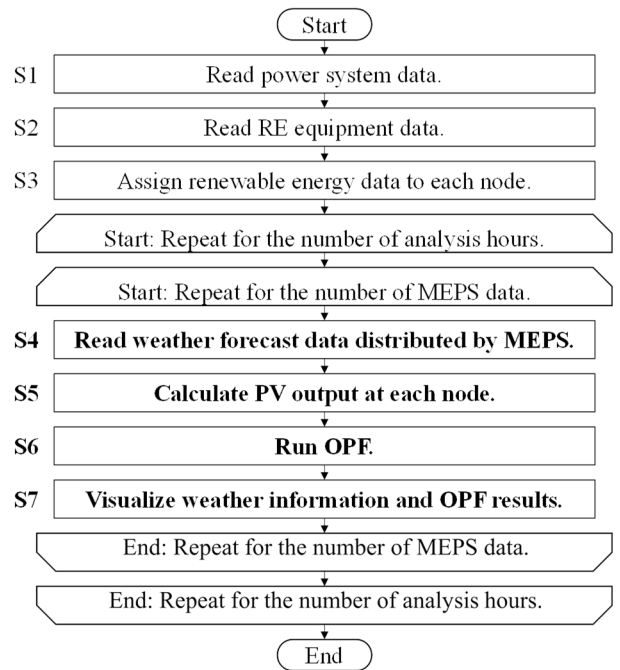


Fig. 3. Flowchart of the proposed method.

特徴的な部分である。フローチャートの各ステップでの処理を次節以降に示す。

〈3・2〉系統データの読込 (S1) 電力系統のノード・ブランチの構成やインピーダンスに関する情報、各ノードの地図上の位置関係に関する情報などを読み込む。本稿の検討では電気学会 EAST10 機 O/V 系統モデル^(1・7)の各ノードに対して地理情報を付与して解析する。対象系統は東日本の電力系統を参考に作成された系統である旨の記載があるものの、変電所、送電線の位置に関する情報は無い。そ

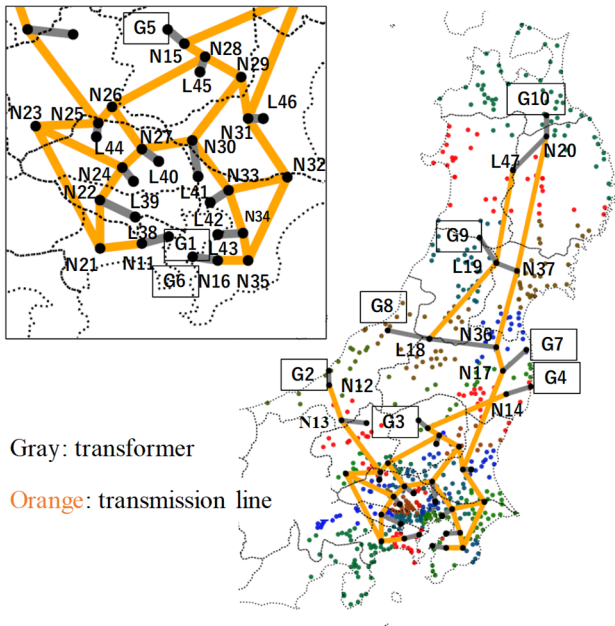


Fig. 4. Power system.

ここで、東京電力および東北電力が公開している情報⁽¹⁸⁾、⁽¹⁹⁾等を参考に Fig. 4 のように具体的な地理関係を想定して解析する。図中灰色の線は変圧器、橙色の線は送電線を表している。本稿の検討では様々な位置にノードが分散した条件で検討するために変圧器の1次側と2次側が離れた位置にあると設定して検討している。図中黒丸はノードを表しており、ノード名に L が付いている箇所には需要と調相設備が、L および N の付いている箇所には PV が導入されている。黒線で囲っている G の付くノードは同期発電機を表す。地図上で色を付けている点は資源エネルギー庁により再エネの導入状況が公開されている市町村の役所の位置である⁽²⁰⁾。また、本稿ではブランチ N36-N17 (ノード N36 と N17 を結ぶブランチを表す) を境に N37 などが含まれる系統を「東北系統」、N14 などが含まれる系統を「東京系統」と称して議論している。なお、Fig. 4 は python のライブラリである pandapower⁽²¹⁾ と cartopy⁽²²⁾ により描画した。

〈3.3〉再エネデータの割り当て (S2・S3) 基幹系統の解析を行う場合には一般的に下位系統を縮約する。例えば本稿で用いる EAST10 機モデルの負荷ノードは 275kV のノードに縮約されており、275kV 未満の下位系統を含めた全負荷が 275kV ノードに入力される想定となっている。本稿では 500kV、275kV の各母線 (Fig. 4 の L および N の付くノード) に対して PV を導入する。ここで、各ノードの PV の容量については、資源エネルギー庁の公開データを用いる⁽²⁰⁾。本稿では 2021 年 12 月の各市町村の再エネ設備量および日射量の予報値から PV 出力を算出し、最も大円距離の近いノードに出力を割り当てており、Fig. 4 で色が同じ地点は同一ノードに割り当てられていることを表す。

〈3.4〉MEPS データの読込 (S4) MEPS のデータは気象庁から GRIB 2 形式と呼ばれる国際標準のデータ形

式で配布されており、過去データも入手できる⁽²³⁾ので、これを読み込む。MEPS は 3 時間刻みの予報値のみ提供しており、PV 出力の算出に用いる日射量は 3 時間の平均値が配信される。同じ時刻を初期時刻値とする 1 時間刻みの MSM の予報値の比率で 1 時間平均値に案分する。

〈3.5〉PV 出力の算出 (S5) PV 出力は太陽光発電協会による変換式⁽²⁴⁾を参考に、MEPS の日射量予報値を用いて次式で算出する。

$$P_c^{PV} = I_c \delta \eta S \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 P_c^{PV} は市町村 c の太陽光発電出力、 I_c は市町村 c に最も近い点の MEPS による日射量予報値、 δ は補正係数、 η はシステム効率、 S は設備容量を表す。

〈3.6〉最適潮流計算の実行 (S6) 本稿では発電機の燃料費の最小化を目的とした拡充系統モデルの文献における調相設備・タップ比考慮ケースの定式化を用いて検討する⁽¹⁷⁾。定式化の概要を以下に示す。定式化の詳細を 8・1 節に示しており、対応する式番号を以下に記載している。

目的関数：発電機の総燃料費 (最小化) ((2)式)

変数：発電機の有効・無効電力出力、母線電圧の大きさ・位相、変圧器のタップ比 (タップ位置を連続値に緩和した値であり一次公称電圧を基準とした pu 値で表す)、調相設備の投入量 (連続値に緩和)

等式制約：交流の潮流方程式 ((3)式, (4)式)

不等式制約：発電機の有効・無効電力の上下限 ((5)式, (6)式)、母線電圧の大きさの上下限 ((7)式)、送電線・変圧器の有効電力潮流の大きさの上限 ((8)式)、位相基準に関する制約 ((9)式)、調相設備の投入量の上下限 ((10)式)、変圧器タップの上下限 ((11)式)

上記の定式化のうち、有効電力に関する潮流方程式 ((3)式) に MEPS の日射量予報値に基づき算出した P_c^{PV} が陽に含まれる点が本稿における解析で特徴的な部分である。

〈3.7〉気象予測情報と計算結果の可視化 (S7) OPF の計算結果を地図上にマッピングする。気圧、雲量など OPF の計算には直接用いない予報値についても地図上に可視化して援用情報として提供する。

4. 数値実験による評価

〈4.1〉概要 本章では 3 章で示した運用の評価方法に関して、基礎的な評価として電気学会 EAST10 機 O/V 系統モデルを用いて検討する。

〈4.2〉計算条件 特に需要が大きく、日射量も大きい 2021 年 8 月の 1 カ月間を対象に検討する。日本時間 9 時が初期値の MEPS の予報値を用いて翌日の 12 時、13 時、14 時の 3 時間の運用結果を評価する。特に PV 出力が大きい 3 時間コマを対象としている。なお、本検討では 12:00~13:00 の平均値を 12 時と定義して記載しているため注意されたい。補正係数は太陽光発電協会の表示ガイドラインに記載されている結晶系シリコン太陽電池に対する参考値⁽²⁴⁾を

用いており、システム効率パワーコンディショナの各メーカーサイトを参考に 0.98 と設定する。なお、解析対象の 2021 年時点において PV と比較して風力発電の導入量は少ないため、風力発電の出力は解析において考慮していない。系統全体の需要は全需要の合計値が東京電力・東北電力の過去の需要実績⁽²⁵⁾、⁽²⁶⁾と一致するように設定する。需要の配分比率は電気学会 EAST10 機 O/V 系統モデルと同じ比率とし、無効電力は電気学会の資料に記載されている相関式から算出する⁽¹⁷⁾。同期発電機の起動停止状態は、G2・G7（いずれも原子力の想定）の停止を基本とし、それ以外は起動とする。ただし、G2・G7 を停止すると需給が維持できない場合があり、その場合は G2 を起動した。また、電圧の上下制限約について、一部ケースで制限を満たさない条件があったため EAST10 機 O/V 系統モデルの設定値から一律 5% 緩和した。OPF は非凸非線形最適化問題であり、これを解ける主双対内点法⁽²⁷⁾が実装された汎用最適化ソルバーの IPOPT (Interior Point Optimizer)⁽²⁸⁾を用いて解く。

〈4・3〉 評価方法 日射量の予報値に基づき計算された OPF 結果について、各送電線の有効電力潮流の計算結果を評価する。具体的には前日時点での MEPS の予報値と当日の実績相当値による計算結果を比較する。また、Fig. 1 の C の領域に相当する比較技術として不確実性を考慮しない情報である MSM-GPV の予報値（これは MEPS のメンバー00 と同じ予報である）を用いた解析結果との比較も行う。今回の評価方法においては東日本の各市町村レベルにおける日射量を入力データとして用いる。日射量は気象庁の主要な観測所で常に観測されているものの、市町村レベルの観測値はない。そこで、何らかの推定値を実績相当値とする必要があり、本稿では解析対象時刻の直前の MSM-GPV による予報値を実績相当値とする。MSM-GPV を用いれば MEPS と同じ地理的粒度の情報で評価できるメリットがある。一方、直前とはいえ予報値であるため実測値との誤差が懸念されるため、事前検討として気象庁による観測値との比較を行い、実績相当値としての妥当性を評価しており 8・2 節にて述べる。

〈4・4〉 結果 Fig. 5 は典型的な 5 日間における N36-N17（東北系統と東京系統を結ぶ送電線ブランチ）の有効電力潮流である。図中 α のように MEPS のばらつきが大きい日もあれば、 β のようにばらつきの小さい日もある。これに対し、MSM-GPV を用いた場合には α は誤差が極めて大きくなるが、MEPS では誤差をカバーしている。一方、 γ のように MEPS でもカバーできない日が存在することも読み取れる。

〈4・5〉 考察 α 、 β のようなばらつきの違いを定量的に評価するため、8 月 1 カ月間（31 日間×3 時間=93 時間コマ）の各時間コマにおける MEPS による 21 点の計算結果の標準偏差を降順に並べた結果を Fig. 6(a) に示す。また、 γ のような大外しを定量的に評価するために MEPS の各メンバーによる計算値の上下限值からの逸脱量の絶対値につ

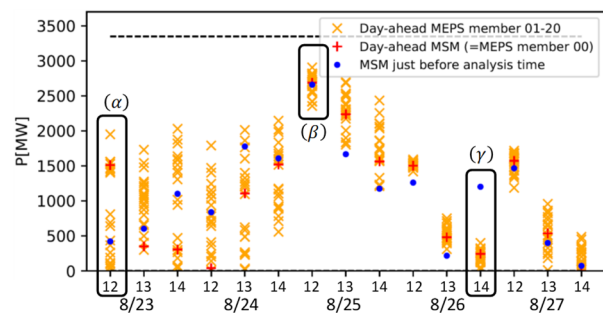
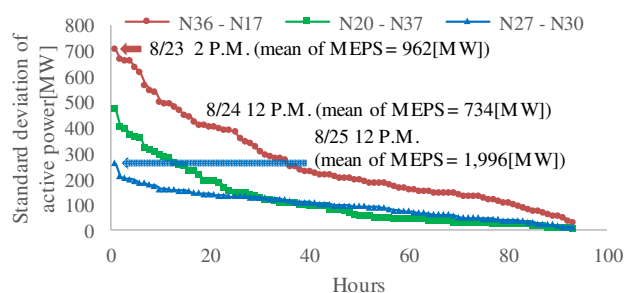
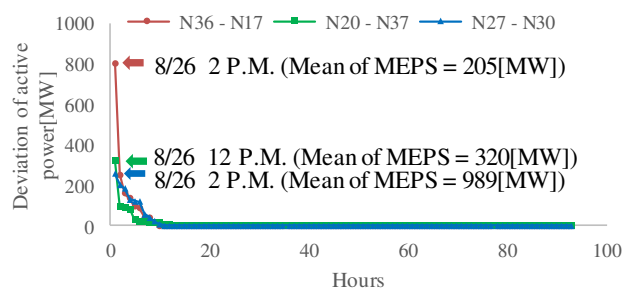


Fig. 5. Calculation results for a representative 5-day period of N36-N17.



(a) Standard deviation



(b) Deviation

Fig. 6. Statistical summary of calculation results

いても同様に Fig. 6(b) に示す。なお、Fig. 6 では逸脱量の最大値が大きい 10 か所の送電線のうち、地理的に離れた 3 送電線を示している。各最大値の点については参考までに MEPS による 21 点の平均値も併記している。標準偏差は時間に応じて様々に変化することが読み取れ、また逸脱の頻度については最大でも 13 時間コマであり、86% の時間コマでは逸脱が発生しない。ただし、2021 年 8 月 26 日の 14 時の N36-N17 のように、平均の約 4 倍程度と大きな逸脱となる場合があることも読み取れる。

5. 気象状態と運用結果の関係

4 章の数値実験において特に MEPS の各メンバーに対する結果のばらつきが大きかった、Fig. 5 α の日時（8 月 23 日 12 時）について、東日本の地図上に各市町村の日射量、各送電線の容量に対する有効電力潮流の割合、各ノードの電圧を可視化した結果を Fig. 7 に示す。メンバー01（図の (a)）は全体的に日射量が大きく、メンバー06（図の (b)）は

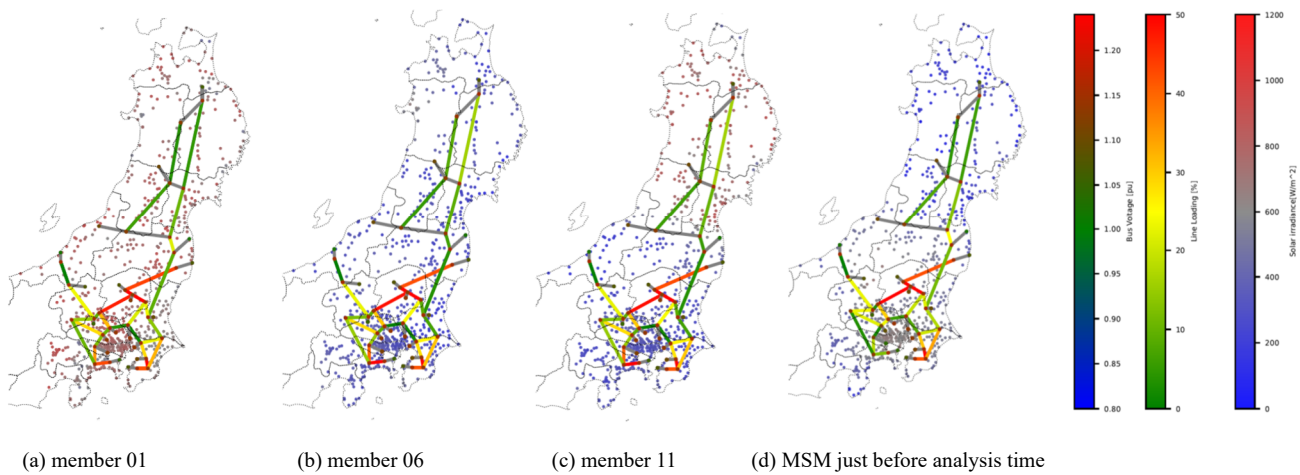


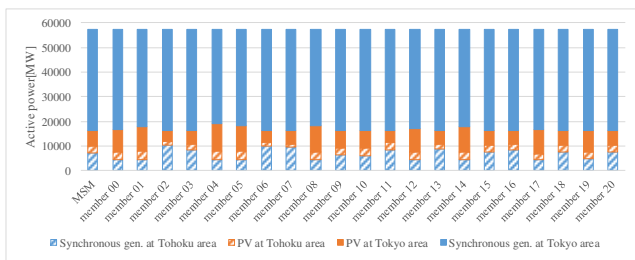
Fig. 7. Visualization of weather information and OPF results for 2021/8/23 12P.M.

全体的に日射量が小さい。一方、メンバー11（図の(c)）は東北系統の日射量が大きく、東京系統の日射量が小さい傾向であり、メンバーに応じて日射量が大きく異なることが分かる。実績相当値（図の(d)）は全体的に日射量が小さく、メンバー06に近い傾向である。これに対して各送電線の有効電力潮流も異なることが読み取れる。

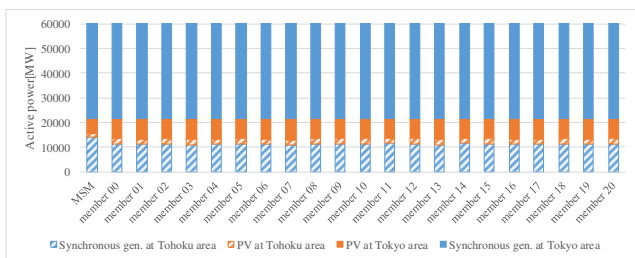
Fig. 8は先述の Fig. 5αの日時も含めた運用結果が特徴的な日時について、東京系統・東北系統それぞれの同期機の出力とPV出力を積み上げた棒グラフである。棒の高さは送電線での有効電力損失の差に起因して若干異なるものの概ね一致する。一番左の「MSM」が実績相当値に対する計算結果を表す。それ以外はMEPSの各メンバーに対する計算結果を表す。Fig. 8(a)のように8月23日12時はPV出力の予測値のばらつきが大きい。これに対して東京系統の同期機の出力の変化が小さく、主に東北系統の同期機が調整代になることが分かる。この日は需要が大きく、東京系統の発電機は概ね最大出力付近で運転されているため東北系

統の余力で需給調整される構図である。Fig. 9はN36-N17（東北系統と東京系統の連系線に相当）の有効電力潮流と東北系統の発電合計値（同期機出力+PV出力）の関係である。東北系統の発電合計値の変化に対してN36-N17の有効電力潮流のばらつきが非常に大きいことが読み取れる。一方、実績相当値が大きく外れた8月26日14時（Fig. 5γの日時）についてはFig. 8(b)のようにMEPSに基づくPV出力の前日予測はほぼ一致しているのに対して、実績相当値は予測より過少になる。この結果、実績相当値では需給維持のために東北の同期機の出力が大きくなって、Fig. 9(b)に示す通り連系線潮流が大きくなる。

また、Fig. 5βのように、8月25日12時においてN36-N17は容量付近で運用されている。今回検討した計算ケースにおいては全ケースのOPFが収束したが、容量以内とする制約条件を満たせずにOPFが収束しない場合には系統混雑の発生リスクがあるものと評価することも可能である。

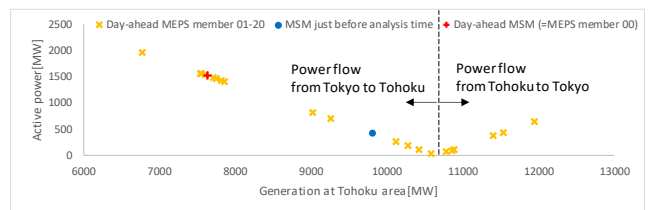


(a) Results of 2021/8/23 12 P.M.

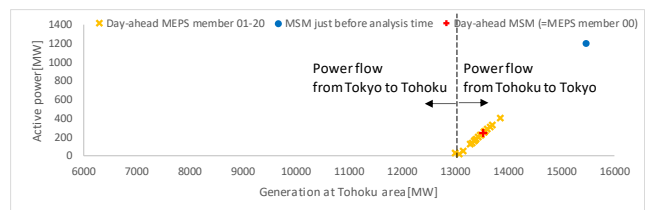


(b) Results of 2021/8/26 2 P.M.

Fig. 8. Generation output at each area.



(a) Results of 2021/8/23 12 P.M.



(b) Results of 2021/8/26 2 P.M.

Fig. 9. Relationship between active power flow on N36-N17 and total generation in Tohoku system.

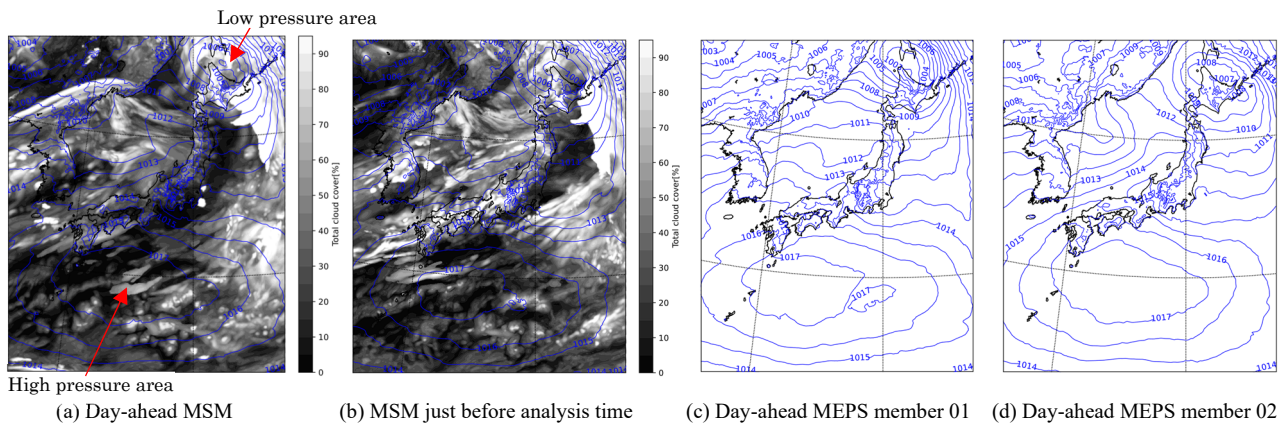


Fig. 10. Mean-sea-level barometric pressure and total cloud cover of 2021/8/26 2 P.M.

6. 気象予報を活用した分析

4章に記載の通り、2021年8月26日はMEPSによる不確実性の範囲外に当日の運用実績相当値が来る場合があった。この日の気象状況について分析する。ここで、一般的に高気圧の周辺では下降気流が発生して雲が発生しづらくなり、日射量も大きくなりやすい。一方、低気圧の周辺では上昇気流が発生して雲が発生しやすく日射量も小さくなりやすい。ここでFig. 10の(a)は2021年8月26日14時の前日時点におけるMSM-GPVによる海面更正気圧と全雲量を可視化した図である。Fig. 10はpythonのライブラリのbasemapを用いて描画した⁽²⁹⁾。気圧は1hPa刻みで可視化しており、北海道付近に低気圧、本州の南部に高気圧があることが読み取れ、解析対象である東日本付近は低気圧と高気圧の間に位置している。これに対して東日本付近の雲量は少なく予報されている。一方Fig. 10の(b)は当日実績相当値とした直前のMSM-GPVの予報値であり、気圧配置は前日時点と類似しているものの、東日本付近の雲量がaと比較して多い(日射量が少ない)ことが分かる。ここで、大竹らの論文⁽³⁰⁾では今回の気圧配置のように高気圧の端に本州が位置するような位置関係の場合に雲の発生を予測するのが難しく、日射量の予測値が大きく外れる事例を紹介している。これに対してFig. 10のc, dはそれぞれMEPSのメンバー01、メンバー02による海面更正気圧の予報値を可視化した図(MEPSでは雲量は配信されていない)であり、解析対象の東日本付近が高気圧の端に位置しており、大竹らの分析に近い状況で一致していることが考察できる。このような気圧配置の場合には予報が外れるリスクを考慮した系統運用を行うような意思決定も可能になる。上記のように、気象予報情報を電力系統解析に取り入れ、かつ不確実性を考慮して多角的に考察を行うことで運用の高度化を図ることが可能となる。

7. まとめ

本稿では不確実性を考慮した気象予測情報に基づき基幹系統運用の多様性を評価する方法について検討した。具体的には気象庁から2019年より配信されているMEPSによる日射量の予報値からPV出力を推定し、OPFを実行することで基幹系統の送電線の有効電力潮流や発電機出力の運用状態を評価した。MEPSを含め不確実性を考慮した気象予報の情報をOPFに取り入れた取り組みはこれまでになく、本研究で得られた知見を以下に述べる。

- ・ 誤差を包含した運用状態を評価可能 予報値による計算結果と実績相当値による計算結果を比較した。まず不確実性を考慮しない(従来から存在する)情報であるMSM-GPVの予報値を用いると送電線の有効電力潮流の運用状態が実績と大きく乖離する場合があった。これに対してMEPSを用いれば誤差を包含した複数の運用状態を評価できることを示した。
- ・ 実績相当値を多くの条件で包含 実績相当値に対する送電線有効電力潮流の計算値についてMEPSの各メンバーによる計算値の上下限值からの逸脱量の絶対値を計算した。逸脱量の最大値が大きい3送電線を対象に評価し、86%の時間コマで逸脱が発生しない結果を得た。一方、稀ではあるがMEPSの全メンバーによる運用結果が実績から大きく乖離するケースがあることも明らかになった。
- ・ 大外しケースの気象状態を考察 実績から大きく乖離するケースの海面更正気圧と全雲量の予報値を可視化した図を描画し、解析対象の東日本付近が高気圧の端に位置するような、先行研究で予報に誤差が発生しやすいと指摘されている状況に近いことも分かった。このような気圧配置の場合には予報が外れるリスクを考慮した系統運用を行うような意思決定も可能になる。

本稿では不確実性を考慮した気象予報の情報をOPFに取り入れる方法に関する検討を行い、上述のような知見を得ることができた。今回の解析では基礎検討として、有効電

力潮流の上限などの系統制約を満たす中で、最も経済的になるように発電機出力などを決定する OPF の問題設定について電気学会 EAST10 機 O/V 系統モデルを対象に解いた。一方、現実に系統運用者が運用できる電源は調整力として確保した電源に限られる。そこで、今後は今回提案した運用状態の予測方法に基づき、系統混雑を回避するために調整力の運用計画を策定する方法について検討する。

また、本稿では MEPS の全メンバーによる運用結果が実績から大きく乖離するケースにおける気象状態の事例を 1 ケース解析した。今後はさらに他のケースについても分析し、予報が外れるリスクを加味した運用計画方法についても検討を行う。

8. Appendix

〈8・1〉最適潮流計算の定式化 本稿で実行する最適潮流計算の定式化を以下に示す。交流の潮流方程式を解く、所謂 AC-OPF による定式化である。

(1) 変数

- ・ p_g^{gen} : 母線 g における PV 以外の発電機の有効電力出力
- ・ q_g^{gen} : 母線 g における PV 以外の発電機の無効電力出力
- ・ v_i : 母線 i の電圧の大きさ
- ・ θ_i : 母線 i の電圧の位相
- ・ s_i : 調相設備 i の投入量 (電圧 1pu の時の遅れ無効電力供給量)
- ・ t_{ij} : ノード i, j を結ぶブランチのタップ比 (送電線ブランチの場合は 1 とする)

(2) 定数・集合

- ・ A_g, B_g, C_g : 発電機 g の燃料費関数の係数
- ・ P_i^{load}, Q_i^{load} : 母線 i の有効電力負荷, 無効電力負荷
- ・ G_{ik}, B_{ik} : タップ比が 1pu のときのコンダクタンス, サセプタンス行列の i, k 成分
- ・ $P_g^{gen, min}, P_g^{gen, max}$: 発電機 g の有効電力最小値・最大値
- ・ V_i^{min}, V_i^{max} : ノード i の電圧の大きさの最小値・最大値
- ・ $P_{ij}^{line, max}$: ノード i と j を結ぶブランチの有効電力潮流の大きさの上限
- ・ R : 位相基準のノード番号
- ・ s_i^{min}, s_i^{max} : ノード i の調相設備の投入量の最小値・最大値
- ・ $t_{ij}^{min}, t_{ij}^{max}$: ノード i と j を結ぶタップ比の最小値・最大値
- ・ \mathbb{G} : 発電機が設置されている母線番号の集合
- ・ \mathbb{B} : 母線の集合
- ・ \mathbb{L} : 全ブランチの始端・終端ノードの組み合わせの集合
- ・ \mathbb{S} : 調相設備投入ノードの集合
- ・ \mathbb{T} : タップ比を変数とするブランチの始端・終端ノードの組み合わせの集合
- ・ \mathbb{C}_i : 母線 i に最も大円距離の近い市町村の集合

(3) 目的関数 (2)式のように燃料費の最小化を目的関数とする。

$$\min. \sum_{g \in \mathbb{G}} A_g + B_g p_g^{gen} + C_g p_g^{gen2} \dots \dots \dots (2)$$

(4) 制約条件 制約条件を(3)式~(11)式に示す。

・ 有効電力に関する潮流方程式

$$p_i^{gen} - p_i^{load} + \sum_{c \in \mathbb{C}_i} P_c^{PV} - v_i \sum_{k \in \mathbb{B}} v_k \{G_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k)\} / t_{ik} = 0 \quad \forall i \in \mathbb{B} \dots \dots \dots (3)$$

3 項目は最近隣の市町村における MEPS の予報値に基づき(1)式で求めた PV 出力の合計値がノード i に流入することを表している。

・ 無効電力に関する潮流方程式

$$q_i^{gen} - Q_i^{load} + v_i^2 \left\{ B_{ii} - \sum_{k \in \mathbb{B} \setminus \{i\}} (B_{ik} - B_{ik} / t_{ik}^2) \right\} - v_i \sum_{k \in \mathbb{B} \setminus \{i\}} v_k \{G_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) - B_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k)\} / t_{ik} + s_i v_i^2 = 0 \quad \forall i \in \mathbb{B} \dots \dots \dots (4)$$

・ 発電機 g の有効電力・無効電力出力の上下限

$$P_g^{gen, min} \leq p_g^{gen} \leq P_g^{gen, max} \quad \forall g \in \mathbb{G} \dots \dots \dots (5)$$

$$Q_g^{gen, min} \leq q_g^{gen} \leq Q_g^{gen, max} \quad \forall g \in \mathbb{G} \dots \dots \dots (6)$$

・ ノード i の電圧の大きさの上下限

$$V_i^{min} \leq v_i \leq V_i^{max} \quad \forall i \in \mathbb{B} \dots \dots \dots (7)$$

・ ノード i と j を結ぶブランチ (送電線・変圧器) の有効電力潮流の大きさの上限

$$-P_{ij}^{line, max} \leq G_{ij} v_i^2 - G_{ij} v_i v_j \cos(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} v_i v_j \sin(\theta_i - \theta_j) \leq P_{ij}^{line, max} \quad \forall (i, j) \in \mathbb{L} \dots \dots \dots (8)$$

・ ノード R の位相を 0 とする制約

$$\theta_R = 0 \quad \forall i \in \mathbb{B} \dots \dots \dots (9)$$

・ ノード i の調相設備の投入量の上下限

$$s_i^{min} \leq s_i \leq s_i^{max} \quad \forall i \in \mathbb{S} \dots \dots \dots (10)$$

・ ノード i と j を結ぶタップの上下限

$$t_{ij}^{min} \leq t_{ij} \leq t_{ij}^{max} \quad \forall (i, j) \in \mathbb{T} \dots \dots \dots (11)$$

〈8・2〉実績相当値の妥当性評価 本稿では解析対象時刻の直前の MSM-GPV による予報値を実績相当値として用いて分析を行った。本章ではその妥当性について検討を行う。気象庁では 1 時間積算の水平面全天日射量を一部の気象観測所で観測・公開しており^(3・1)、東日本においては青森、盛岡、秋田、山形、仙台、福島、宇都宮、前橋、つくば、銚子、東京、甲府の 12 か所で測定されている。そこで、各地点における 2021 年 1 月 1 日から 2021 年 12 月 31 日までの期間について 12 時から 13 時の 1 時間積算日射量と、その直前である日本時間 12 時を初期値とする同時刻の MSM-GPV の各観測点近傍での予報値を比較する。

まず東京における観測値と MSM-GPV 予報値の関係を Fig. 11 に示す。観測値と MSM-GPV 予報値は近い値になることが多いが、誤差が生じる場合もある。また、各地点での観測値と MSM-GPV 予報値との誤差に関する統計値を Table 2 に示す。MAE は誤差の絶対値を平均した平均絶対誤差、%MAE は誤差の絶対値の合計を実測値の合計で割った

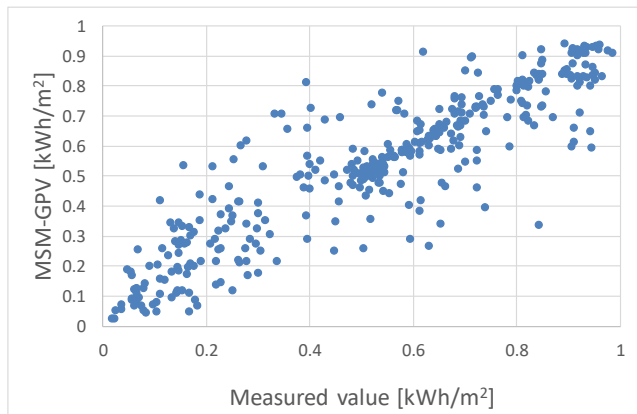


Fig. 11. Relationship between MSM-GPV and measured value at Tokyo.

Table 2. Statistics comparing measured values to MSM-GPV.

Point	MAE [kWh/m2]	%MAE [%]	RMSE [kWh/m2]	CORR
Aomori	0.105	22.4	0.149	0.853
Akita	0.157	34.3	0.209	0.726
Morioka	0.132	27.5	0.176	0.787
Sendai	0.101	20.7	0.143	0.859
Yamagata	0.107	22.7	0.148	0.840
Fukushima	0.101	21.4	0.152	0.860
Utsunomiya	0.084	16.0	0.124	0.878
Maebashi	0.086	16.2	0.132	0.865
Tsukuba	0.085	16.4	0.125	0.875
Choshi	0.090	16.2	0.134	0.876
Tokyo	0.081	15.4	0.121	0.894
Kofu	0.092	15.6	0.153	0.809

値, RMSE は誤差の二乗和の平均値の平方根, CORR は相関係数である。誤差要因としては MSM-GPV が 5km の格子点の情報のため, 日射量の観測点とは厳密には解析位置が異なること, あるいは数値予報の誤差が考えられる。一方で相関係数は多くの点で 0.8 以上と強い相関がある。また, 今回は単地点での誤差を評価したが, 本編における解析では複数地点の合算値を解析に用いることからならし効果により誤差が低減する。

以上の解析を踏まえ, 本編に記載の通り, 市町村レベルの観測値が存在せず, 何らかの推定値を実績相当値とする必要がある中では解析対象時刻の直前の MSM-GPV による予報値を実績相当値として評価することは妥当と評価して解析を行った。

謝辞

MSM-GPV ソースデータは, 気象庁(JMA)により提供されました。また当該データにアクセスする為に次の URL のアーカイブを利用しました。

<http://dias.tkl.iis.u-tokyo.ac.jp/gpv/>

文 献

- (1) M.B. Cain, R.P. O'Neill and A. Castillo : "History of optimal power flow and formulations", Federal Energy Regulatory Commission, Vol. 1, pp.1-36 (2012)
- (2) H. Abdi, S. D. Beigvand, and M. La Scala : "A review of optimal power flow studies applied to smart grids and microgrids", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 71, pp.742-766 (2017)
- (3) 経済産業省資源エネルギー庁 : 「第 6 次エネルギー基本計画」(2021)
- (4) 電力広域的運営推進機関 需給調整市場検討小委員会 : 「系統混雑を考慮した調整力確保の考え方について<混雑発生時の需給調整市場における課題と対応>」(2022)
- (5) F. Capitanescu, J.M. Ramos, P. Panciatici, D. Kirschen, A.M. Marcolini, L. Platbrood and L. Wehenkel : "State-of-the-art, challenges, and future trends in security constrained optimal power flow", Electric power systems research, Vol. 81, No.8, pp.1731-1741 (2011)
- (6) F. Capitanescu, S. Fliscounakis, P. Panciatici, and L. Wehenkel : "Cautious operation planning under uncertainties.", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, No.4, pp.1859-1869 (2012)
- (7) F. Capitanescu : "Critical review of recent advances and further developments needed in AC optimal power flow", Electric Power Systems Research, Vol. 136, pp.57-68 (2016)
- (8) T. Masuta, H. Sugihara, N. Yamaguchi, F. Uno, H. Ohtake : "Economic-load dispatching Control by Optimal Power Flow with Photovoltaic Energy Curtailment Considering Transmission Network Constraints in Interconnected Bulk Power Systems", IEEE Transactions on Power and Energy, Vol. 139, No.2, pp.74-83 (2019) (in Japanese)
益田泰輔・杉原英治・山口順之・宇野史睦・大竹秀明 : 「大規模連系系統における太陽光発電の出力抑制を考慮した最適潮流計算による経済負荷配分制御」, 電気学会論文誌 B, Vol.139, No. 2, pp.74-83 (2019)
- (9) 気象庁情報基盤部 : 「令和 4 年度数値予報解説資料集」(2023)
- (10) 気象予報士試験受験支援会 : 「気象予報士かんたん合格テキスト 学科専門知識編」(2014)
- (11) 気象庁予報部数値予報課 : 「数値予報 60 年誌 ~数値予報課 60 年(1959-2019)の歩み~」(2020)
- (12) 気象庁情報基盤部 : 「配信資料に関する技術情報 第 575 号 ~メソ数値予報モデル GPV および MSM ガイドランスの予報時間延長について~」(2021)
- (13) 気象庁予報部 : 「メソスケール気象予測の現状と展望」, 数値予報課報告・別冊第 66 号 (2020)
- (14) K. Ono, M. Kunii and Y. Honda : "The regional model-based mesoscale ensemble prediction system, MEPS, at the Japan meteorological agency.", Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 147, No.734, pp.465-484 (2021)
- (15) 気象庁情報基盤部 : 「配信資料に関する技術情報 第 505 号 ~メソアンサンブル数値予報モデル GPV の提供開始について~」(2019)
- (16) T. Oozeki, H. Ohtake, T. Takamatsu and K. Nakajima : "A forecasting error evaluation by means of converting 1 hour from averaged 3-hour data of Meso-ensemble prediction systems", Proceedings of JSES conference, pp. 305-306 (2022)
大関崇・大竹秀明・高松尚宏・中島虹 : 「メソアンサンブル予報システム (MEPS) の 3 時間データの 1 時間値への補間による予測誤差評価」, 日本太陽エネルギー学会講演論文集 2022 年度 (令和 4 年度) 研究発表会, Vol., No., pp. 305-306 (2022)
- (17) 電力系統標準モデルの普及・拡充調査専門委員会 : 「モデル拡充に関する報告書 (マニュアル)」(2021)
- (18) 東京電力パワーグリッド株式会社 : 「275kV 以上系統空容量マッピングの記載方法ならびに留意事項について」(2023), https://www.tepco.co.jp/pg/consignment/system/pdf_new/akiyouryou_kikann.pdf (2024/1/7 アクセス)
- (19) 東北電力ネットワーク株式会社 : 「電力系統図 (1 次系)」(2023), <https://nw.tohoku-epco.co.jp/consignment/system/announcement/pdf/5001.pdf> (2024/1/7 アクセス)
- (20) 経済産業省 資源エネルギー庁 : 「再生可能エネルギー電気の利用

- の促進に関する特別措置法 情報公表用ウェブサイト」,
<https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfoSummary> (2024/1/7 アクセス)
- (2 1) L. Thurner, A. Scheidler, F. Schäfer, J.H. Menke, J. Dollichon, F. Meier, S. Meinecke, M. Braun : “pandapower - an Open Source Python Tool for Convenient Modeling, Analysis and Optimization of Electric Power Systems”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 33, No.6, pp.6510–6521 (2018)
- (2 2) Met Office : “Cartopy: a cartographic python library with a Matplotlib interface”, <https://scitools.org.uk/cartopy> (2010 - 2015) (2024/1/7 アクセス)
- (2 3) 日本気象株式会社, <https://n-kishou.com/corp/> (2024/1/7 アクセス)
- (2 4) 太陽光発電協会 : 「表示ガイドライン (2023 年度)」 (2023)
- (2 5) 東京電力パワーグリッド株式会社 : 「過去の電力使用実績データ」,
<https://www.tepco.co.jp/forecast/html/download-j.html> (2024/1/7 アクセス)
- (2 6) 東北電力ネットワーク株式会社 : 「過去実績データのダウンロード」,
<https://setsuden.nw.tohoku-epco.co.jp/download.html> (2024/1/7 アクセス)
- (2 7) 中田和秀 : 「主双対内点法」, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, Vol.64, No. 4, pp.218-224 (2019)
- (2 8) “Ipop Documentation”, <https://coin-or.github.io/Ipopt/> (2024/1/7 アクセス)
- (2 9) “Welcome to the Matplotlib Basemap Toolkit documentation”,
<https://matplotlib.org/basemap/> (2024/1/7 アクセス)
- (3 0) H. Ohtake, F. Uno, T. Oozeki, Y. Yamada, H. Takenaka, and T.Y. Nakajima : “Outlier events of solar forecasts for regional power grid in Japan using JMA mesoscale model.”, Energies, Vol. 11, No.10, pp.2714 (2018)
- (3 1) 気象庁 : 「過去の気象データ・ダウンロード」,
<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php> (2024/1/7 アクセス)