

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04428

研究課題名（和文）将来の電力系統における新しい運用・制御を考慮した電源開発計画と電力市場制度設計

研究課題名（英文）Generation planning and electricity market design considering novel operation and control for future grids

研究代表者

益田 泰輔（Masuta, Taisuke）

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：40635794

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、スポット市場と需給調整市場を考慮した長期の需給計画シミュレーションを行って、電力系統全体としての電源開発計画を評価する手法を提案した。複数の電源開発計画シナリオを想定したケーススタディを行って、提案手法によって電力市場の持続可能性を検証することができることを明らかにした。また、調整力のある電源の kW 値と kWh 値を同時に考慮した電力市場価格を、発電機起動停止計画シミュレーションによって推定する方法を提案・評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電源開発計画シミュレーションでは、一般には経済的に有利とされる石炭機を建設するシナリオよりも、環境性が高い LNG 機を建設するシナリオのほうが有利であるという結果が得られた。これは、市場制度の巧拙によって運用費の高い電源の開発も経済的に成立する可能性があることを示している。また、調整力のある電源の電力市場価格の推定では、これまで金額として表すことが難しかった kW 値を価格として算出することが可能となっており、今後の市場制度設計における価格設定の方針を決める際に有益な情報となる。

研究成果の概要（英文）：In this study, generation expansion planning evaluation method by long-term supply-demand simulation considering both the spot and balancing markets to verify the sustainability of the electricity markets is proposed and evaluated. The effectiveness of the proposed method is verified through the case study considering several scenarios. In addition, an estimation method of the market price of the generator with the reserve capacity considering both kW and kWh values by generator unit commitment simulation is proposed and evaluated.

研究分野：電力系統工学

キーワード：電源開発計画 電力系統 太陽光発電 発電機起動停止計画 電力市場

1 . 研究開始当初の背景

本研究では、電力系統の発電設備計画である電源開発計画に注目する。電力系統は経済性と信頼性の確保を目的として計画（数年～数十年）・運用（数分～数年）・制御（数秒～数分）されている（図1）。ここで、「運用」は「制御」のあり方を前提に、「計画」は「運用」のあり方を前提に決定することになるため、長期にわたる電源開発計画策定のためには、運用や制御まで考慮する必要がある。

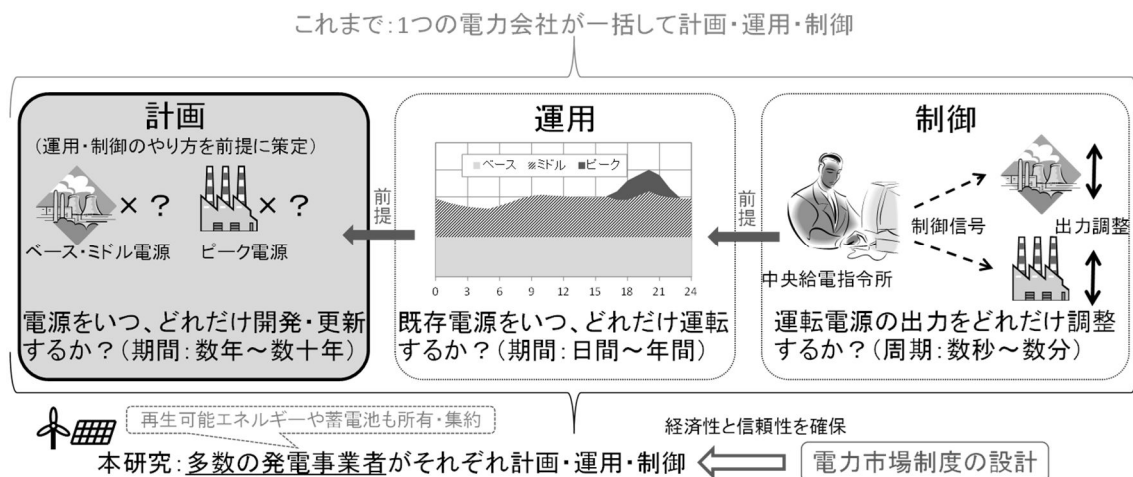


図1: 電力系統の計画・運用・制御と本研究の位置付け

我が国では、これまで発電・送電・配電の全てを行う電力会社が一地域に一社のみ存在しており、電源開発計画は長期的な視点のみで検討が可能で、電力会社にとって最適な計画が即ち社会全体にとって最適な計画となっていた。また、火力、水力、原子力といった従来電源のみが開発計画の対象となっており、電力の流れ（電力潮流）も発電側から需要側へという一方向のみであった。従来の電源開発計画問題では風力・太陽光発電などの再生可能エネルギー電源の不確実性や電力潮流の複雑さを考慮する必要がないのが前提であり、前述した「運用」や「制御」の視点からの「計画」へのフィードバックは経験や定性的判断によるもので、数理的な計画問題としての定義は不十分であった。

一方、電力システム改革を契機として、我が国の電力供給体制は大きく変わりつつある。電力会社の発電部門は送配電部門から法的に分離され、大規模（既存電力）から小規模（新電力）まで発電事業者の数が大きく増加し、市場原理に基づいて個々の発電事業者が計画・運用・制御を行うことになる。新しい電力市場制度の設計によっては、経済外部性のある電源ベストミックスなどを考慮した従来の計画・運用・制御は成り立たなくなる。

将来の電力系統では、競争環境の進展と再生可能エネルギーの大量導入という二つの大きな変化のもとで、電源開発計画が策定される。ここでは、各発電事業者の利益確保という短期的な視点の考慮も必要となり、発電事業者にとって最適な計画が社会全体にとって最適な計画になるわけではない。また、従来電源だけでなく、不確実性を有する再生可能エネルギーや、蓄電池などの非在来型制御リソースも含めた新しい運用・制御を行うという前提のもと、各発電事業者は電源開発計画を策定することになる。さらに、事業者数と電源種類の増大、電力潮流の複雑化、事業者ごとに異なる計画期間なども問題を複雑化させる。

2 . 研究の目的

本研究の目的は二つある。一つ目は、発電事業者の電源開発計画の策定・評価手法を開発することである。市場制度や規制による間接・直接の制約条件を考慮して利益最大化のため各発電事業者が電源開発計画を策定する手法と、各事業者の計画を電力系統レベルで集約した全体の電源開発計画を社会全体の効用最大の観点で評価する手法を提案・検証する。二つ目は、電源開発計画策定のための電力市場制度を設計することである。CO₂排出などの環境負荷低減と再生可能エネルギーの不確実性に対応し、健全な競争環境下で各発電事業者がその所有する電源を計画・運用・制御していくことが可能な電力市場制度を設計する。

3. 研究の方法

本研究は、主として高速計算機システムを用いたシミュレーションによって実施した。研究に関する調査としては、再生可能エネルギーや非在来型制御リソースが導入された電力系統の計画・運用・制御に関する研究開発や電力市場制度の設計について学術論文や報告書をもとに調査し、以下「(1)電源開発計画の策定・評価」および「(2)市場制度の設計」の指針を決定した。なお、2021年度に開始された我が国の需給調整市場の取引結果等の最新情報を適宜確認・反映して研究を進めた。研究方法・内容を項目ごとに述べる。

(1) 電源開発計画の策定・評価

初めに、従来電源を所有する発電事業者が従来電源の火力発電機を廃止して代わりとなる電源を新設する状況を想定し、従来電源の火力発電機を新設する場合と、その火力発電機と同容量の太陽光発電を新設した場合における事業者の利益について評価し、従来電源と太陽光発電の建設優位性について検討し、電源の ΔkW 価値が事業者の利益に与える影響を評価した。次に、発電事業者が需給調整市場とスポット市場の両市場に参加する状況を想定し、需給調整市場に参加することでスポット市場において逸失する可能性のある利益(逸失利益)の計算方法について検討した。この際、需給調整市場とスポット市場を通して決定される電力系統全体の需給計画を推定し、需給調整市場における調整力 ΔkW 市場で調達された調整力を考慮し、かつスポット市場のシングルプライスオークションで決まる落札電力量に応じて発電機出力配分を決定する方法を考案した。さらに、複数の電源開発シナリオにおける発電事業者全体の損益を計算する方法を提案し、長期の需給計画シミュレーションによって評価した。

(2) 市場制度の設計

調整力のある電源を定量的に評価する方法の一つである発電機起動停止計画手法(UC, Unit Commitment)を用いたシミュレーションによって市場取引を模擬する市場モデルについて検討した。UCは、混合線形計画法(MILP, Mixed Integer Linear Programming)として定式化されることが多く、解を得るためには膨大な時間がかかる。そこで、計算時間の大幅な短縮を目的に、MILPとして定式化される系統全体の需給計画を線形計画問題(LP, Linear Programming)に緩和することで計算時間短縮を図る手法を開発し、緩和前後での需給バランスや運用コストを比較して手法の妥当性を検証した。ここで、電源開発計画の検討にて前述した方法を用いることで、LP緩和で求めた需給計画における出力配分から需給調整市場とスポット市場における約定結果を推定することが可能であることを確認した。さらに、需給調整市場における調整力提供を考慮し、需給調整市場における取引価格を決定する方法を提案した。

4. 研究成果

(1) 電源開発計画の策定・評価

従来電源を所有する発電事業者がスポット市場と需給調整市場の収益で電源投資回収すると仮定し、各市場での入札価格の決め方を複数通り想定した需給運用シミュレーションによって発電事業者の損益を計算した。結果から、固定費を含む入札価格の設定によるスポット市場での固定費回収は困難であることが分かった。また、太陽光発電導入量が増えると同時にスポット市場売上は減少し、調整力提供量が増加することから、需給調整市場での収益を高める必要があることが分かった。

以上を踏まえ、複数の電源開発計画シナリオを想定し、スポット市場と需給調整市場を考慮した発電機 UC を決定して長期の需給計画シミュレーションを行い、両市場を通じた発電事業者全体としての損益を計算し、電力系統全体として電力市場の持続可能性を確認するための電源開発計画シミュレーション手法を提案した。発電機 UC は、現状の需給調整市場における商品区分である二次調整力 ΔkW と三次調整力 ΔkW の取引量を考慮できるように MILP で定式化した。

提案手法は、系統規模約 15 GW 程度の電力系統モデルを用いて 2 通りの電源開発シナリオ(30年間)を想定したシミュレーションによって評価した。2つのシナリオで石油火力機を中心とする火力機を段階的に廃止し、シナリオ 1 では石炭火力機を、シナリオ 2 では LNG 火力機を中心に新設することとした。図 2 に、各シナリオの損益計算の結果を示す。図 2 の上半分は発電事業者全体としての市場からの収益であり、社会が発電事業者全体に支払うコストとなる。下半分は発電事業者全体が負担するコストで、上半分から下半分を差し引いたものが発電事業者全体の損益(赤色の点)となる。図 2 より、シナリオ 2 の利益はシナリオ 1 より高く、想定したシミュレーション条件では、LNG 機を新設するシナリオ 2 が石炭機を新設するシナリオ 1 よりも発電事業者全体として電源投資回収の可能性が高いと言える。ただし、図 2 の上半分である社会コスト、下半分である事業者コストのいずれもシナリオ 2 がシナリオ 1 より高い。図 3

に示すように、シナリオ 1 は石炭機で、シナリオ 2 は石炭機以外で価格が決まる状況が多くなり、シナリオ 1 の平均スポット市場価格がシナリオ 2 より低くなるため、シナリオ 1 の事業者コストはシナリオ 2 より低く、利益も同様に低くなると考えられる。なお、発電事業者は需給調整市場による収益見込に応じてスポット市場の入札価格を決定するため、需給調整市場とスポット市場での価格の設定方法によって各シナリオにおける損益は変化する。このように、一般には環境性が高い LNG 機より燃料費の安い石炭機が経済的に有利とされるが、本研究では、市場制度の巧拙によって運用費の高い電源の開発も経済的に成立する可能性があることを示した。

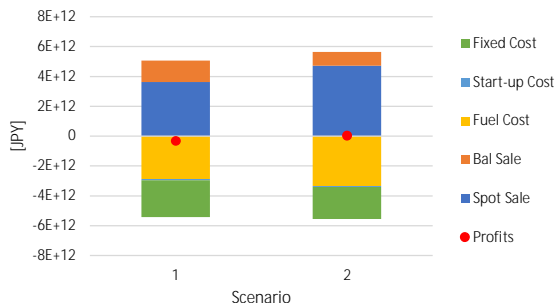


図 2：シナリオごとの損益計算結果

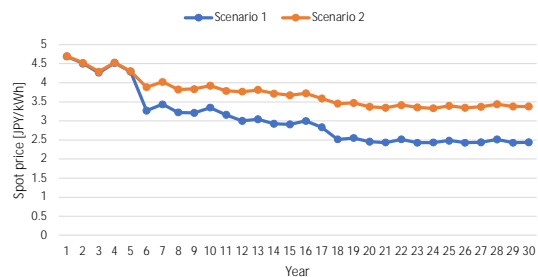


図 3：シナリオごとのスポット市場価格

(2) 市場制度の設計

(1)で述べた通り、市場制度設計の一つである「どう電力市場価格を設定するか」が発電事業者の損益に大きく影響する。本研究では、次の 2 つの課題に取り組み、調整力のある電源の価値を評価する電力市場価格を、UC を用いて推定した。

第 1 に、LP 緩和法による計算負荷低減手法を提案し、エリアごとの限界費用に着目し MILP と LP 緩和の精度を比較した。さらに、理論値とみなす MILP と LP 緩和の計算結果と比較した際に、LP 緩和がどのような条件で乖離が生じるのかを検討した。図 4 は、それぞれ各月における MILP と LP 緩和の計算時間である。MILP による計算では、ひと月当たり最長時間 1090 分、最短時間 197 分の時間を要した。計算時間のひと月当たりの平均値は、約 480 分であるので、一年間の通年計算をする場合 5740 分、すなわち約 4 日の計算時間が必要ということになる。一方、LP 緩和による計算ではほとんどの月で計算時間は同程度であり、平均 33.7 分で計算することができた。一年間の通年計算をする場合 404 分、すなわち 7 時間未満で計算を終えることができる。すなわち、LP 緩和により、93%の計算時間短縮が可能となった。エリア別のスポット市場価格は、LP 緩和では 0-1 変数を緩和したため、火力機の運用に乖離が発生するが、MILP と比較してそれほど大きく変わらないことが確認できた。

第 2 に、調整力のある電源を定量的に評価するために、UC を用いて需給調整市場とスポット市場における価格の詳細について検証した。 ΔkW 価値と kWh 価値を同時に考慮した手法を検討し、需給調整市場において ΔkW 価格の傾向や各市場からの売上などを評価した。提案手法は、まず、発電事業者の ΔkW 市場の入札価格を、発電所の建設費と燃料費を設備利用率で割った値で与え、次に UC による 1 年間の市場全体の電源運用をシミュレーションし、kWh 価格と ΔkW 価格、各電源の設備利用率を求める。このとき、先に想定した設備利用率と、シミュレーションで得られた設備利用率は異なるため、新たに得られた設備利用率から ΔkW 価格を再計算する。その後、再度、電源運用シミュレーションを実施する。このように、 ΔkW 入札価格の設定と電源運用シミュレーションを、設備利用率が収束するまで繰り返すことで、 ΔkW 価格と kWh 価格を同時に算出する。図 5 は、北海道エリアの各電源の設備利用率の収束状況である。10 回の繰り返し計算により、同エリア内、同程度の設備容量であれば、設備利用率の平均値から ΔkW 価格が得られることが分かった。図 6 は、PV 導入量別エリア別の LNG 発電所の ΔkW 価格である。再エネの導入量が増加すると設備利用率が減少するため ΔkW 価格が高くなる傾向がある。なお、電源規模別では、大型電源の方が、 ΔkW 価格が安くなる傾向がある。

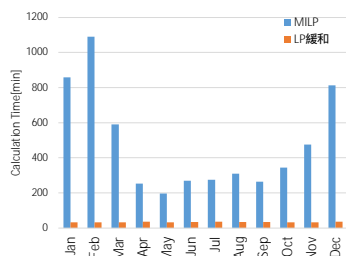


図 4：月別計算時間

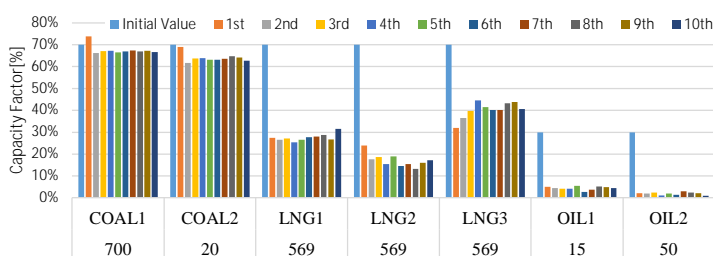


図 5： ΔkW 価格計算ループにおける設備稼働率の変化

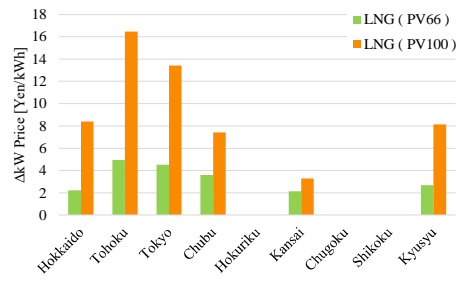


図 6 : PV 導入量別エリア別の LNG 発電所 ΔkW 価格

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yamashita Ryo, Yamaguchi Nobuyuki, Masuta Taisuke, Manabe Yusuke	4. 巻 1
2. 論文標題 Analysis of Fast Method of Electricity Prices in Scenarios of High Penetration of Renewable Energy Resources	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. of 2022 IEEE International Conference on Power Systems Technology (POWERCON)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/POWERCON53406.2022.9929685	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nagae Tsubasa, Masuta Taisuke, Manabe Yusuke, Yamaguchi Nobuyuki	4. 巻 1
2. 論文標題 Daily Generation Schedule Estimation for the Entire Power System Considering Japanese Electricity Markets	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. of 2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)	6. 最初と最後の頁 250-254
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ISGTAsia54193.2022.10003559	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岡田剛、長江翼、益田泰輔
2. 発表標題 スポット市場で成立する 発電計画の最適性に関する考察
3. 学会等名 電気学会 全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田邊裕隆、服部光輝、益田泰輔、河辺賢一
2. 発表標題 需給調整市場・スポット市場に基づき成立する需給計画の推定に関する基礎検討
3. 学会等名 電気学会 電力技術・電力系統技術・半導体電力変換合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡田剛、長江翼、益田泰輔
2. 発表標題 発電事業者の電源構成がスポット市場で成立する 発電計画の最適性を与える影響分析
3. 学会等名 電気学会 電力技術・電力系統技術・半導体電力変換合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長江翼、岡田剛、田邊裕隆、真鍋勇介、益田泰輔、山口順之
2. 発表標題 複数の電力市場を考慮した発電事業者の電源開発計画の評価
3. 学会等名 電気学会 電力技術・電力系統技術・半導体電力変換合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山下諒、山口順之、益田泰輔、真鍋勇介
2. 発表標題 発電機起動停止計画問題における kW 市場を考慮した発電電力量の推計
3. 学会等名 電気学会 電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長江翼、益田泰輔、真鍋勇介、山口順之
2. 発表標題 発電事業者のスポット市場の損益の分析
3. 学会等名 電気学会 電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山下諒、山口順之、益田泰輔、真鍋勇介
2. 発表標題 発電機起動停止計画におけるMILP と LP 緩和の発電機運転状態と経済性の比較
3. 学会等名 電気学会 電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長江翼、益田泰輔、真鍋勇介、山口順之
2. 発表標題 発電事業者のスポット市場での入札価格設定と損益の関係分析
3. 学会等名 電気学会 電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山下諒、山口順之、益田泰輔
2. 発表標題 MILP と LP 緩和を用いた電力スポット市場価格の推計結果の比較
3. 学会等名 電気学会 電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長江翼、益田泰輔、真鍋勇介、山口順之
2. 発表標題 需給調整市場における予約電源逸失利益の計算方法に関する考察
3. 学会等名 電気学会 電力技術・電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山下諒, 山口順之, 益田泰輔, 真鍋勇介
2. 発表標題 発電機起動停止計画問題におけるLP緩和を用いたスポット市場価格の推計
3. 学会等名 電気学会 電力系統技術研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長江翼, 益田泰輔, 真鍋勇介, 山口順之
2. 発表標題 発電計画の最適性を維持したスポット市場価格の計算手法
3. 学会等名 電気学会 電力技術・電力系統技術・半導体電力変換合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長江翼, 松井飛樹, 益田泰輔, 真鍋勇介, 山口順之
2. 発表標題 太陽光発電を考慮した発電事業者の電源開発計画に関する基礎検討
3. 学会等名 電気学会 電力技術・電力系統技術・半導体電力変換合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松井飛樹, 長江翼, 益田泰輔, 真鍋勇介, 山口順之
2. 発表標題 kW価値を考慮した発電事業者の電源開発計画の基礎検討
3. 学会等名 電気学会 電力技術・電力系統技術・半導体電力変換合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山下諒, 戸塚奈保子, 山口順之, 真鍋勇介, 益田泰輔
2. 発表標題 電源起動停止計画問題における LP 緩和法を用いた燃料費の推計
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長江翼, 松井飛樹, 真鍋勇介, 益田泰輔, 山口順之
2. 発表標題 電源計画における従来電源と太陽光発電の建設優位性に関する検討
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	山口 順之 (Yamaguchi Nobuyuki) (50371224)	東京理科大学・工学部電気工学科・准教授 (32660)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	真鍋 勇介 (Manabe Yusuke)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------