

## 論文の内容の要旨

論文題目 : Building and District Energy Optimization using Metaheuristics and Machine Learning

(メタヒューリスティクスおよび機械学習を用いた建物・地域エネルギーシステムの最適化に関する研究)

氏 名 池田 伸太郎

本論文では、建物および地域エネルギーシステムの最適運転を実現するための方法論について纏めたものである。エネルギーシステムの最適運用では、予測した熱負荷や電力負荷などの条件を満たすように発電機器や熱源機器の発停、出力調整、ポンプの流量調整などをおこない電力消費量や運用コストなどを最小化することを目的としている。

近年、時刻毎に異なる電気料金単価が設定されるダイナミックプライシング制度や、電力需給逼迫時に需要家が自ら節電等をおこなうデマンドレスポンス、分散型エネルギーの普及や蓄エネルギー設備の導入による機器構成の複雑化、それに伴う運用方法の多様化などによって最適化の必要性が高まっている。

そこで、本論文では主に以下の二点について検討をおこなった。

### I) 1日前運用最適化における汎用的かつ効率的な最適化手法の提案

はじめに、翌日24時間分の熱源機器等の運用計画を最適化手法によって決定する「1日前運用最適化」に関して記述する。これは本論文の大部分を構成する内容である。本分野の研究には長い歴史があり、従来線形計画法や動的計画法が多く用いられてきた。しかし1日前運用最適化では、i) 機器制御値の離散化、ii) 機器の非線形特性、iii) 熱源機の最低連続運転時間、iv) 現実的な計算時間、以上の4点を考慮しなければ実務への応用は難しい。

線形計画法では、i) に関して、本来離散化されている機器出力の設定値を連続値として簡

易化している。混合整数線形計画法を用いて整数変数を扱った研究はあるが、計算量を少なくするために機器の発停 (ON/OFF) を0, 1の二値変数として扱っているケースが多く、出力の離散化まで検討した研究は見当たらない。ii) の条件では、線形計画法は線形条件を仮定しており、多くの研究では定格COPのみを規定するのみで部分負荷特性を無視する研究が多い。仮に区分線形近似を実際のシステムに適用する場合でも、機器メーカーが提示するカタログから入手可能な熱源機器の特性は非常に限定されており、実務現場において区分線形近似を随時適切に行うことは容易でない。

次に動的計画法では、i)、ii)、iii) のいずれの条件も問題なく適用することが可能であるが、同手法の計算量は操作変数の数に対して指数関数的に増加することから、大規模システムなどではiv) の条件を満たすことが難しくなる。

そこで本論文では、線形計画法や動的計画法といった決定論的手法の適用が困難な大規模問題に対して、メタヒューリスティクスと呼ばれる近似的手法を用いて準最適解を得るアプローチを検討した。メタヒューリスティクスは特定のモデルに依存しない汎用性、計算コストをユーザー側で指定できる実務的なメリット等から近年エネルギーシステムの運用最適化に適用する研究が増加している。ただし、従来のメタヒューリスティクスではi) やiii) の制約条件が設定された研究は見当たらず、実際の機器制御から大きく逸脱した条件で研究がおこなわれることが多かった。そこで、本論文では下記の内容で前述の4条件を加味した最適化手法の検討・評価を行った。

- メタヒューリスティクスのうち、制約付き非線形最適化に対して効率的な探索が可能であることが明らかになっている $\epsilon$ DE ( $\epsilon$ -constrained differential evolution) を、大規模エネルギーシステムの最適化に適用し、その利用可能性を明らかにした。(Chapter 3)
- 蓄エネルギー設備を含むシステムにおいて運用コスト最小化とエネルギー消費量最小化を同時達成する多目的最適化手法として $\epsilon$ DEをベースとした $\epsilon$ MODE ( $\epsilon$ -constrained multi-objective differential evolution)を提案した。(Chapter 3)
- $\epsilon$ DEの探索安定性を向上させるために、局所解に至る原因となる理論的な欠点を補う手法(RJ: random jumping)を追加した $\epsilon$ DE-RJを提案・適用した。(Chapter 6)
- 計算時間短縮のためにANN (Artificial neural network)による機器モデリングを組み込んだハイブリッド手法( $\epsilon$ DE-RJ with ANN)を提案・適用した(Chapter 7, 8, 9)

また、PV及び蓄電池の運転方法に関して、 $\epsilon$ DEによる最適化計算で得られた運用計画の規則性を分析することで、最適化計算をおこなうことなく運用方法を簡易的に決定するための指標(ARP: area ratio of prices)を提案した(Chapter 4)。

各チャプターの要点を以下に記す。

Chapter 3では、336個の操作変数を有する非線形システムにおいて、 $\epsilon$ DEにより夏期ピーク日の1日前運用最適化を行った。その結果、従来の経験的な制御と比較して5.7%の日積算

運用コストの削減が可能であり、その計算コストは一般的な計算機において5分程度と実務において十分適用可能な水準であることを示した。

多目的最適化手法( $\epsilon$ MODE)では、従来の $\epsilon$ DEとNSGA-IIと呼ばれる多目的遺伝的アルゴリズムの組合せを試行した。しかし、単純な組合せでは探索が局所解に陥ってしまう現象が見られたため、既存の「連続世代モデル」と呼ばれる手法を「離散世代モデル」と呼ばれる手法に変更し、最終的に良好なパレート解を得ることが可能になった。本アルゴリズムは3目的以上の多目的最適化にも拡張可能な汎用性に優れた手法である。

次に、Chapter 4ではPVと蓄電池、蓄熱槽と空気熱源ヒートポンプが設置されたシステムを対象とした。 $\epsilon$ DEによる運用コスト最小化で得られた運用計画を分析し、PVの発電電力を全量売電する運用計画もしくは全量自家消費する運用方法のいずれかが適切であるのかを決定する簡易的な指標(ARP)を提案した。

次に、Chapter 6では、冷熱系統と給湯系統において地中熱ヒートポンプが組込まれたシステムを対象とした。地中熱ヒートポンプは空気熱源と比較して高効率な運転が期待できる一方、地中熱交換器における温度変化の計算に時間を要するため効率的な探索が必要とされる。そこで、本チャプターでは $\epsilon$ DEにおける局所解からの脱出策を追加した $\epsilon$ DE-RJ (RJ: random jumping)を提案・適用した。 $\epsilon$ DE-RJによる最適化の結果、冷熱系統の運用は経験的な制御と比較して最大16.35%、給湯系統は同2.2%の運用コスト削減となった。また、計算時間は一般的な計算機において16分となり、実務において十分に適用可能な水準であることを示した。

次に、Chapter 7では地中熱ヒートポンプや太陽熱利用、冷凍機やボイラ、蓄熱槽が組込まれた複合システムにおいて、地中熱交換機および蓄熱槽の物理モデルに計算時間が要することに着目し、ANN(Artificial neural network)を利用することにより地中熱交換器単体の計算時間を76%、蓄熱槽では同2000分の1に短縮することが可能になった。

Chapter 8では地域冷暖房システムに上記の $\epsilon$ DE-RJとANNのハイブリッド手法を適用した。その結果、制約条件となる蓄熱槽の出口温度を誤差0.07℃で予測しつつ、物理モデルを用いた場合と比較して全体の計算時間を10分の1以下のまで低減し、従来の経験的な制御に比べて夏季ピーク日の運用コストを10.67%削減することが可能になった。更に、ピーク電力の制限値を加えた運用コスト最小化において、従来制御より6%運用コストを削減しつつ、ピーク電力を17%減少させることが可能であるなど、手法の汎用性を確認した。

Chapter 9では地域冷暖房よりも変数が多く最適化問題が複雑化する地域熱融通システムを対象に上記ハイブリッド手法による最適化をおこなった。Chapter 8で提案したANNの学習データは蓄熱槽の運用方法に制限があったが、本チャプターではより汎用性を高めたANNのモデリング方法を提案した。その予測誤差は0.3℃程度となり実用上十分な精度であることを示した。また、近年エネルギーシステム最適化において利用が相次いでいるQ-learningとハイブリッド手法を比較した。その結果、ハイブリッド手法のほうが収束が安定しており、かつ得られた解が18.3%程度優れていることを示した。

## II) 需要変動や太陽光発電の発電量変動などに追従するリアルタイム最適化手法の提案

1日前運用最適化では予測した需要を基に前述の内容で最適化計算を行うが、実際のシステムでは予測値と計測値が異なる場合が少なくない。その際、特に蓄エネルギー設備を持つシステムにおいてどのように運用計画を修正するかが課題である。そこでChapter 5では修正の方法論としてTwo-time steps recalculation (TtsR)を提案した。本来、理想的な修正方法としては予測値とのズレが発生した当該時刻およびその後の全ての時刻の運用計画の修正が挙げられるが計算量が大きい。一方、TtsRでは同理想手法を用いた際の1日全体の運用コストの増加を0.02%に抑えつつ、計算コストを73%削減することが可能であることを示した。

本論文の成果を以下にまとめる。

- 特定のモデルに依存しない最適化手法であるメタヒューリスティクスを単体建物および地域エネルギーシステムの最適化に適用することで、ANNなどの複雑系モデルを含めた非線形整数問題を現実的な計算時間で近似的に解くことが可能となった。
- メタヒューリスティクスのうち、効率的な制約付き非線形最適化が可能な既存手法である $\epsilon$ DEを多目的最適化に拡張した $\epsilon$ MODEを提案し、全ての探索個体が制約を満たしつつ非優越解となる良好なパレート解を算出することが可能であることを示した。
- $\epsilon$ DEが理論的に局所解に陥る可能性を有していることを指摘し、遺伝的アルゴリズムの突然変異を模したランダム操作を加えた改善手法である $\epsilon$ DE-RJを提案した。
- 機器構成や規模など複数の条件で $\epsilon$ DEおよび $\epsilon$ DE-RJを適用した結果、夏季ピーク日において経験的な制御と比較して5%~15%の削減効果が得られた。
- 物理モデルをANNに置き換えることで、計算コストを大幅に削減することが可能であることを示した。これにより、評価関数の計算に時間を要する問題に対して $\epsilon$ DE-RJの探索回数を増やすことが可能となり、実務利用上、現実的な時間内により多くの探索を行うことが可能になった。
- リアルタイム制御手法として、前日に決めた運用計画を修正する方法(TtsR)を提案した。これにより時間依存性を持つ蓄エネルギー設備を含むシステムにおいて、計算負荷を低減しつつ、リアルタイムで運用計画を修正することが可能になった。