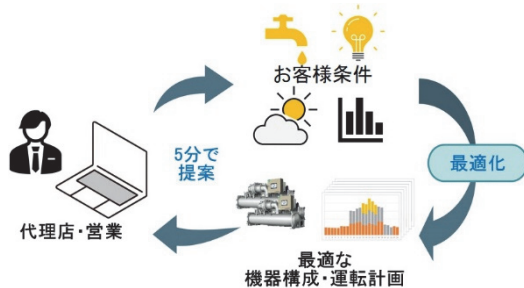


熱源構成の機器・運用総コストを最小化する 機器組合せ最適化技術

The Optimization Program for Machine Combinations that Minimizes Initial Costs and Operational Costs in Heat Source Configuration



山田 直輝*1
Naoki Yamada

立石 浩毅*2
Koki Tateishi

三菱重工業株式会社では、起動・停止や部分負荷運転を行う冷凍機を複数台組み合わせた熱源構成の提案を行う場合がある。この際、容量や機種異なる冷凍機の組合せを考えた場合、選択肢が膨大となり、お客様要求を満たしつつ、コスト最小となる機器組合せを求めるのに設計者の経験と時間が必要になるとの課題があった。この課題に対し、数理最適化と遺伝的アルゴリズムを組み合わせた最適化技術を適用することで、お客様要求を満たす最適な機器組合せを高速に求解する技術を実現したので、その概要を紹介する。

1. はじめに

三菱重工業株式会社(以下、当社)では、お客様の設備計画から要求される運用条件に対して、複数台の冷凍機を組み合わせた熱源構成を提案している。運用条件には、用途だけでなく熱源設備を設置する地域における気温、要求負荷、稼働日数が挙げられる。その他にも電動機の電圧、周波数や、起動方式などの条件が指定され、条件に合った機種が選定候補となる。候補となった機種を複数台組み合わせて提案することになるが、実運用可能な機器構成について提案する必要がある。実運用可能な機器構成とは、運用条件の要求負荷に対して能力が不足していないことや、一部の冷凍機の故障時においても運用が継続できることなどが挙げられる。具体的には、時間変化する要求負荷を複数台の冷凍機に分配し、各冷凍機が稼働可能な範囲での部分負荷運転ができる構成が選定できていること、機器構成に含まれる冷凍機のうちでどの1台が故障、もしくはメンテナンスで稼働できない場合でも要求負荷を満足する運転が可能な機器構成とする必要がある。これらを考慮し、導入費用(設置する冷凍機の導入費用)と運用費用(年間の消費電力、水道料金、メンテナンス費用)の合計が最小となる機器構成の提案が必要である。

しかしながら、機種候補に含まれる容量や機種異なる冷凍機の組合せの数は膨大であり、専門知識を有する設計者が時間をかけて選定する必要があるため、[図 1](#) に示すように引合い回答までに時間を要するとの課題があった。本報では、この事業的課題に対して最適化技術を適用し、自動選定を実現した事例について紹介する。

*1 総合研究所 制御システム研究部

*2 総合研究所 制御システム研究部 室長

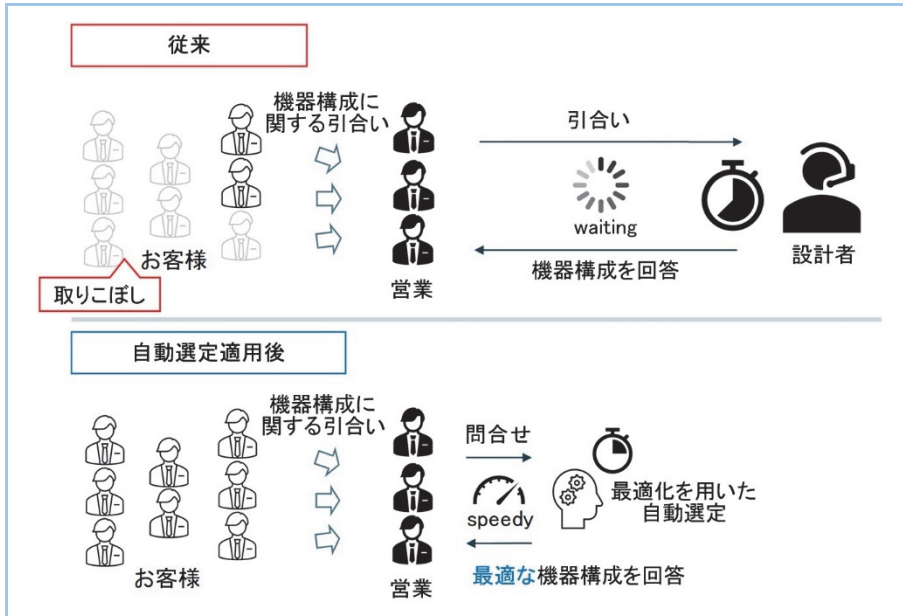


図1 機器構成に関する引合い回答の自動化

2. 最適化技術

2.1 数理最適化と遺伝的アルゴリズムのハイブリッド最適化技術

最適化計算では、導入費用と年間の運用費用の合計が最小となる機器構成を導出する。ただし、運用費用は各冷凍機の起動・停止、負荷配分によって変化するため、運用費用が最小となる運転計画を導出する必要がある。そのため、本最適化計算では、図2に示すように、①運転計画の最適化計算(運転計画問題)、②機器構成の最適化計算(配置計画問題)に問題を切り分けて定式化を行った。①運転計画の最適化は各冷凍機の各時刻における起動停止、負荷を変数として運用費用を最小化する問題として定式化した。運転計画問題は冷凍機の非線形特性を含む混合整数計画問題であり計算規模の大きい問題であるが、特性を線形式の組合せで近似することで計算規模を縮小させ、数理最適化を用いることで高速な求解を実現した。②機器構成の最適化は各機種ごとの設置台数を変数とし、①で求めた運用費用と導入費用の合計を最小化する問題として定式化した。最適化手法としては、バックアップ機制約(単一機器の故障時も運転が継続可能な機器構成であること)のような非線形制約が考慮可能で、設置台数を表す離散変数が取り扱える遺伝的アルゴリズムを採用した。このように、2つの最適化手法を組み合わせ合わせたハイブリッド最適化技術を用いることで、非線形制約を含んだ大規模な最適化問題に対する効率的な求解を実現した。

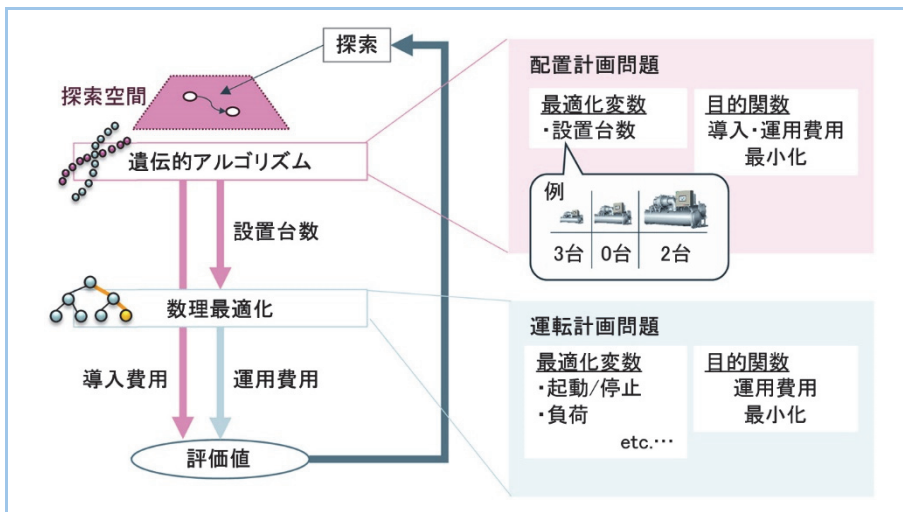


図2 数理最適化と遺伝的アルゴリズムを組み合わせ合わせたハイブリッド最適化

2.2 運転計画最適化における時系列制約

運転計画最適化は前述のとおり、冷凍機の各時刻での起動・停止と負荷を変数とし、運用費用を最小化する最適化問題である。ただし、実運用可能な運転計画を導出する必要があるため、例えば冷凍機が短時間に起動と停止を繰り返すような運転状況は想定していない。そのため本最適化では、時系列制約(最小稼働時間:起動してから停止するまでの最小時間, 最小停止時間:停止してから起動するまでの最小時間)を採用した⁽¹⁾。

図3 に時系列制約を考慮した運転計画の例を示す。時系列制約を考慮することで、冷凍機の起動と停止の繰り返しが発生しなくなることを確認した。

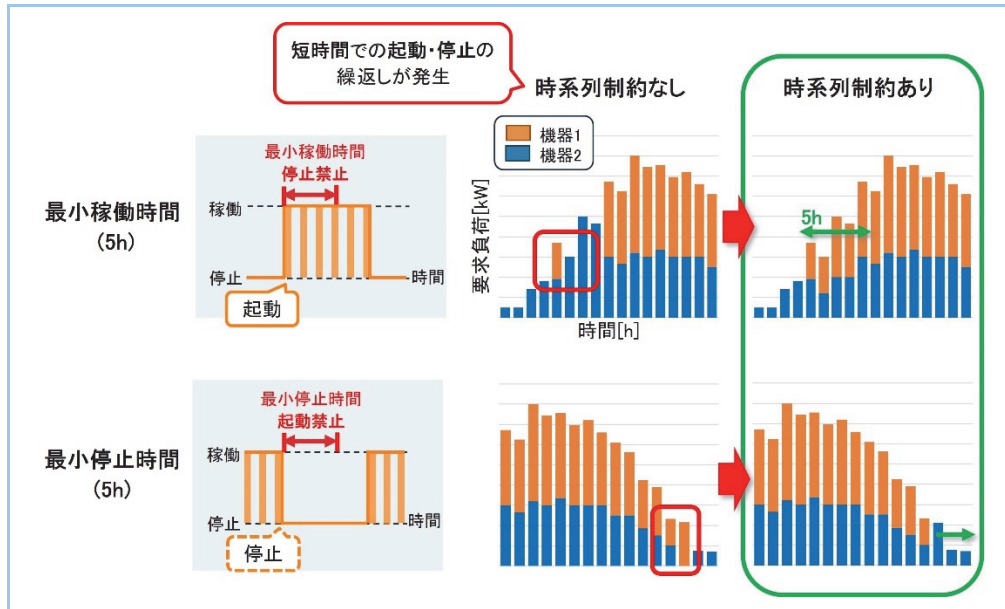


図3 時系列制約を考慮した運転計画の最適化結果

運転計画の最適化結果を示すグラフは、縦軸が要求負荷[kW]で横軸が時間である。本図は機器1、機器2の構成における運転計画であり、負荷の合計が要求負荷を満足する各機器の負荷[kW]を示している。上図の最小稼働時間の例では、機器1の起動後短時間(5h以内)で停止していない。下図の最小停止時間の例では、機器2が停止後短時間(5h以内)で起動していない。

2.3 バックアップ機制約を考慮した機器構成の最適化

機器構成の最適化ではバックアップ機制約を考慮した機器構成の最適化を行う。バックアップ機制約とは、機器構成の内いずれの1台が故障したとしても、要求負荷を満足する運転を継続できるような構成とするための制約である。冷凍機には稼働可能な最小負荷、最大負荷があるため、要求負荷が大きく変動する場合などでは単純に最大容量となる冷凍機を機器構成に余剰に設置するだけではバックアップ機制約は満足できない。機器構成の最適化では、求めた機器構成がバックアップ機制約を満たすことを確認した後、運転計画最適化の結果から運用費用と導入費用の総和を算出し、費用最小となる機器構成を算出する。

図4 にバックアップ機制約を考慮した機器構成、及び費用の総和を示す。バックアップ機制約を考慮しない場合、要求負荷の最大負荷に近い容量を持つ冷凍機を1台設置しているのに対し、バックアップ機制約を考慮した場合は最大負荷の50%程度の容量を持つ冷凍機を3台設置する結果となった。バックアップ機を設置することで余剰となる冷凍機が生じるため費用の総和は増加したが、いずれかの1台が故障しても運転が継続できる組合せであることを確認した。

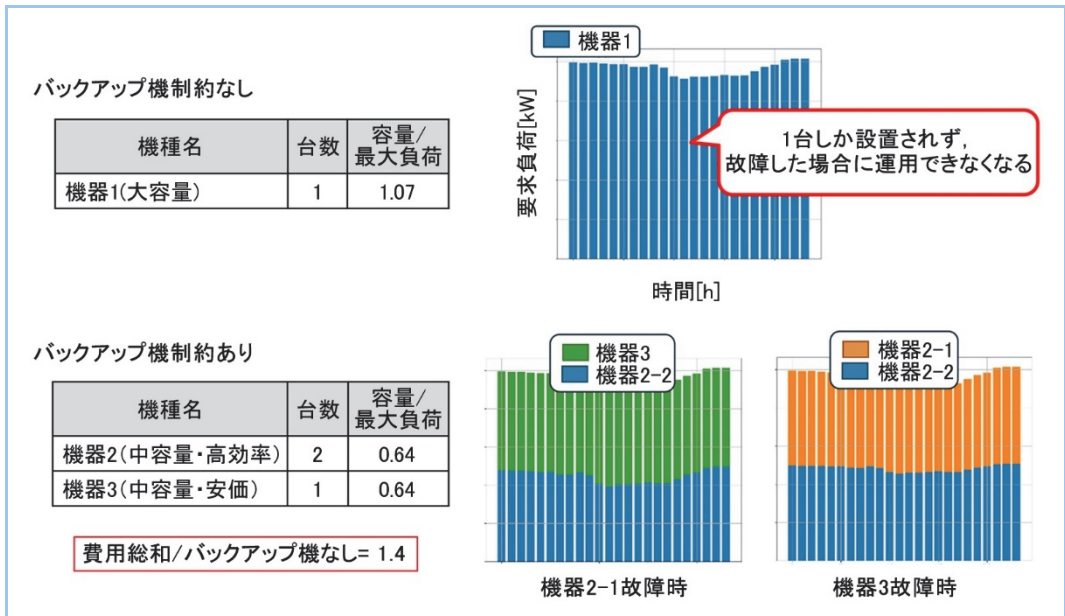


図4 バックアップ機制約を考慮した機器構成の最適化結果

2.4 検証結果

運転計画・機器構成の最適化の計算結果について述べる。計算条件としては 20 機種から最大で 8 台の冷凍機を設置できるものとした。計算結果としては、試行した 12 件の計算条件において全て 5 分以内に計算完了することを確認した。また全ての機器組合せにおける運用費用と導入費用の合計を計算し、最適解として出力された機器構成がコスト最小であることを確認した。

最適化結果の一例として、計算条件(年間の気温・要求負荷)と選定結果を図 5 に示す。手動選定の例として、同一機種の機種 B を 3 台設置した機器構成での導入・運用費用を計算した。最適化による選定結果では、異容量の機種 A, B を組み合わせた機器構成が選定されており、手動選定に比べ約 7% 費用が抑えられる機器構成が導出できた。

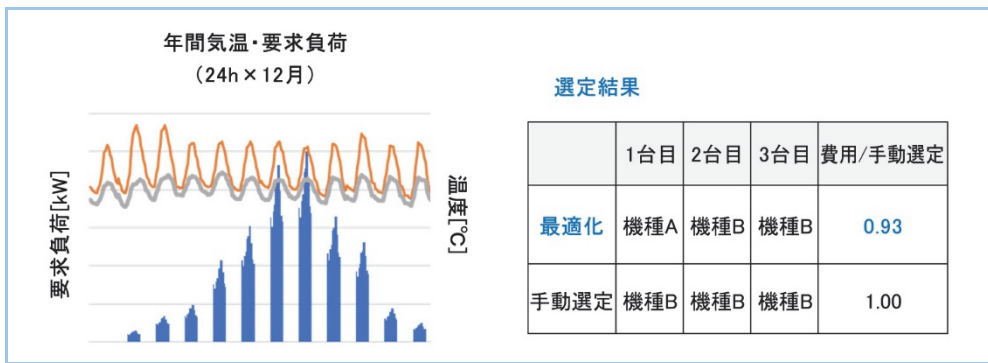


図5 自動機器選定の計算条件(気温・要求負荷)と最適化結果

3. 営業支援システムへの適用事例

熱源プラント事業では海外代理店における冷凍機構成計画検討作業の自動化による回答リードタイム短縮を加速するため、海外代理店に向けた営業支援システムの高度化を行っている。営業支援システムでは、海外代理店がお客様条件をシステムに入力することで、基幹システムのデータベースを流用し冷凍機単体の自動選定・自動見積ができるため、スピーディな引合い回答が実現可能である。ただし、冷凍機単体の選定のみを対象としていたため、複数台の冷凍機を組み合わせた機器構成をあらかじめ定めた上で人手による組合せ選定を行う必要があり、回答までに 1 か月程度を要していた。

そこで機器構成を自動選定するために、営業支援システムへ本最適化技術を適用した。お客

様条件として入力する項目は海外代理店が容易に入力できるように、入力が困難な気温、要求負荷の数値データについては、選択肢として用意した国、運用施設の用途(工場、商業施設、など)、最大要求負荷を選択すると基幹システムのデータベースを流用し自動で生成される機能を開発した。営業支援システムにおける機器構成最適化機能の入出力の概要を図6に示す。本技術の導入により、簡単な入力でコスト最小な機器構成を5分以内に自動選定することができ、スピーディな提案が可能となった。

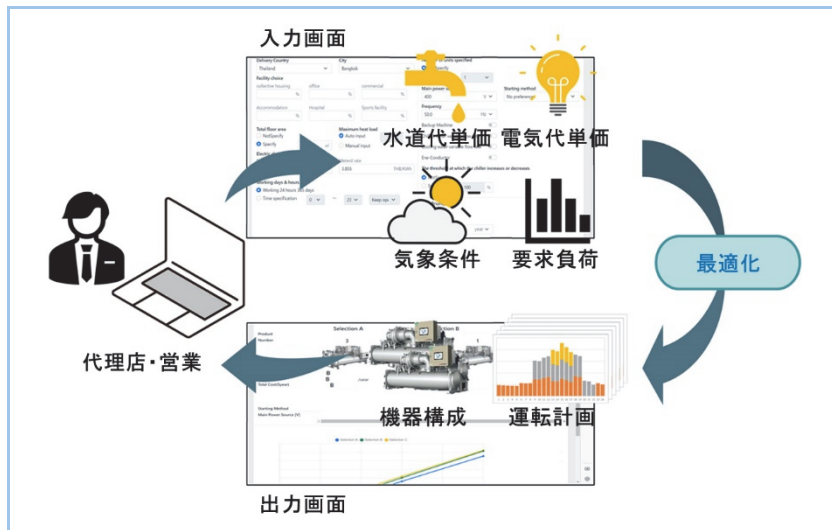


図6 機器構成最適化機能の入出力概要

4. まとめ

当社では、複数台の冷凍機を組み合わせたコストを最小化する熱源構成の提案を行っている。本報では、運用費用を最小化する運転計画の最適化と、運用費用及び導入費用を最小化する機器構成の最適化を、数理最適化と遺伝的アルゴリズムを組み合わせたハイブリッド最適化を用いることで、高速に求解する技術について紹介した。また、熱源プラント事業にて運用されている営業支援システムに、本技術を適用した冷凍機の機器構成最適化機能を実装し、最適な機器構成が自動選定できることを確認した。これにより、従来、人手による選定に時間を要して1か月かかっていた構成検討の回答に対し、5分以内にて回答可能とした。本機能を活用して機器構成の引き合い対応件数を増加させ、受注拡大を図る。

今後、本技術については当社他製品への展開を進めていく。また、営業支援システムの利用者からのフィードバックを集め、自動選定機能としての使用性向上に向けた継続的なアップデートを計画している。

参考文献

- (1) Bendotti, P. et al, The Min-up/Min-down Unit Commitment polytope, Optimization Online (2016)