

分散型エネルギーシステムの最適設計

—設計と運用の階層的関係を考慮したアプローチを中心として—

Optimal Design of Distributed Energy Systems

—Focusing on Approach in Consideration of Hierarchical Relationship
Between Design and Operation—

横山 良平^{1*}

Ryohei Yokoyama

Abstract To attain the highest performance of distributed energy systems, it is necessary to rationally determine types, capacities, and numbers of equipment in consideration of their operational strategies corresponding to seasonal and hourly variations in energy demands. In mixed-integer linear programming (MILP) approaches to the optimal design of the systems, integer variables are used to express the selection, numbers, and on/off status of operation of equipment, and the number of these variables increases with those of equipment and periods for variations in energy demands, and affects the computation efficiency significantly. In this article, past studies on MILP approaches are first reviewed briefly. Then, a formulation of an optimal design problem is presented, which is followed by a solution approach utilizing the hierarchical relationship between design and operation variables proposed to solve the optimal design problem efficiently, which includes a hierarchical branch and bound method, a method of evaluating lower bounds for efficient bounding operations, their implementations into open and commercial MILP solvers. Finally, illustrative and practical case studies on the optimal design of cogeneration systems are presented to show the validity and effectiveness of the proposed method.

Keywords Distributed energy systems, Optimal design, Optimal operation, Mixed-integer linear programming, Branch and bound method, Hierarchical approach

1. はじめに

エネルギー源およびエネルギー変換方式の多様化によって、分散型エネルギーシステムの設計においては、多種多様な機器の中から適切なものを選択することが重要になっている。その場合に、エネルギー需要量の季節的・時間的变化に適した機器の運用方策を同時に考慮する必要がある。また、経済性、省エネルギー性、および環境保全性などの多様な視点から適切なシステムを構築すること要求される。したがって、設計者には、設計・運用に関する種々の代替

1 大阪府立大学大学院工学研究科, 〒599-8531 大阪府堺市中区学園町 1-1

Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai, Osaka 599-8531, Japan

* E-mail address: yokoyama@me.osakafu-u.ac.jp

案を作成・評価・比較し、その中からできる限り優れた案を選定することが求められる。しかしながら、一つの代替案に対しても各種データの作成や種々の評価を行うには長時間を必要とするため、限られた時間内に優れた案を見つけ出すことが困難となっている。

この課題を解決するために、最適化手法を適用して、設計・運用に関する代替案の中から最良の案を導出する方法が考えられる。これまで、混合整数線形計画法 (MILP)、混合整数非線形計画法などの数理計画法、またシミュレーティッドアニーリング、遺伝的アルゴリズムなどのメタヒューリスティクスに基づく様々な手法が提案されてきた。一方、最適化手法を実際の設計に適用するには、モデル変更、パラメータ分析、多目的評価、および複数候補解導出などの多様な機能が要求されるため、各最適化計算においては短時間に確実に最適解を求められる手法の確立が必要不可欠と考えられる。そのため、様々な手法の中でも、機器の種類および運転・停止などの離散的な性質を有する決定変数を表現し易く、比較的最適解を導出し易いと考えられる MILP に基づく手法が多数提案されている。しかしながら、最適化問題の困難さは、システムを構成する機器の数、ならびにエネルギー需要量の変化を考慮するために設定する期間の数に大きく左右され、計算に長時間を要したり、計算に要する記憶容量が制限を超えてしまうことも少なくない。

本稿では、MILP に基づく分散型エネルギーシステムの最適設計に関して、過去に行われてきた研究について述べるとともに、最近著者らが取り組んできた設計および運用変数間の階層的関係を考慮することによって効率的に最適化計算を行うための手法について紹介する。

2. 過去の関連研究

MILP に基づく分散型エネルギーシステムの最適設計に関する初期の研究では、商用の MILP ソルバーでさえ強力ではなかったため、大規模な問題を解くことが困難であり、整数変数を多く含まない小規模な問題が扱われた。例えば、エネルギー需要量の変化を考慮せず、単一期間における運用のみを考慮した最適設計 [14]、少数の期間における運用を考慮した最適設計 [7] に限定されていた。これは、期間数の増大とともに、運用整数変数が比例的に増大し、その結果問題が大規模になり得るためである。その後は、より多数の期間の運用を考慮した最適設計を行えるように、分解法に基づく手法も提案された [9, 20]。

最近では、商用の MILP ソルバーの能力が格段に向上し、多数の期間における運用を考慮した最適設計に関する研究が行われている。それらには、機器の容量を固定して、種類のみを決定変数として扱っているもの [3, 18]、機器の種類および容量を決定変数として扱っているが、容量を連続変数として扱っているもの [2, 16, 17]、機器の容量を固定して、種類および設置台数を決定変数として扱っているもの [4, 11, 12]、機器の性能特性に容量および部分負荷による依存性を考慮していないもの [15, 25]、多目的最適化を扱っているもの [2, 5]、および最適解だけではなくそれに続く複数の準最適解、いわゆる K -ベスト解を導出しているもの [5, 16] などが含まれている。しかしながら、これらの多くの研究では、最適化問題の困難さを避けるため

に、機器の容量を決定変数として扱う場合に連続変数として扱われてきた。そのため、機器の設備費および性能特性を容量の近似関数として表す必要がある、また最適化によって決定された容量の機器が存在するとは限らないという欠点を有している。

そこで、著者らは、機器の容量を離散的に扱い、設計変数として機器の種類、容量、および設置台数を最適に選択するとともに、エネルギー需要量の変化を考慮するために設定した各期間において、運用変数として機器の運転台数および負荷分担を最適に決定するための最適化モデルを提案した [21]。一方、設計整数変数の増大に伴って、運用整数変数も増大するため、多数の期間における運用を考慮することが困難となる。そこで、この課題を解決することを目標とし、設計および運用変数間の階層的関係を考慮することによって効率的に最適化計算を行うための手法を提案するとともに、文献 [10] に掲載されている公開の MILP ソルバーに実装し、このソルバーが適用できる小規模な問題への適用事例によって、手法の妥当性および有効性を示した [23]。また、この手法を発展させ、最適化計算をより効率化させるとともに、商用の MILP ソルバーにも実装し、大規模かつ実用的な問題にも適用できるようにした [24]。ここでは、限界設計および運用問題と名付けた小規模な MILP 問題を解くことによって目的関数最適値の有効な下界を評価し、これを利用して両階層レベルにおいて限定操作を行う方法を提案し、最適化計算の効率化を図った。また、公開の MILP ソルバーに加えて、強力な商用の MILP ソルバーの一つである CPLEX [8] を選定し、それに備わっている callback 関数を利用して本手法の実装を行い、大規模かつ実用的な問題にも適用できるようにした。さらに、例示的および実用的な適用事例を通して、本手法の妥当性および有効性を検証した。以下では、これらの著者らの研究について紹介する。

3. 最適化モデル

図 1 に示すように、分散型エネルギーシステムを構成する候補として考えられるすべての種類の機器から成るスーパーストラクチャーを考え、その中から必要な種類の機器のみを選択することによって、最適なシステムを構成する。このとき、選択する機器については、機器の離散的な容量の中から選択し、最大設置可能台数の範囲内で台数を選択できるものとする。また、選択する機器については、エネルギー需要量の変化を考慮するために設定した各期間において、運転台数および負荷分担を決定するものとする。これらの設計および運用変数の間には図 2 に示すような階層的な関係が存在する。

一例として、図 3 に示すような単純なスーパーストラクチャーを有するシステムについて、最適化問題の定式化を行う。まず、機器の種類、容量、および設置台数に関する条件を次式のように表す。

$$\left. \begin{array}{l} \eta_{ij} / N_{ij} \leq \gamma_{ij} \leq \eta_{ij} \\ \sum_{j=1}^{J_i} \gamma_{ij} \leq 1 \end{array} \right\} (i = 1, 2, \dots, I) \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{ij} &\in \{0, 1\} \quad (j = 1, 2, \dots, J_i) \\ \eta_{ij} &\in \{0, 1, \dots, N_{ij}\} \quad (j = 1, 2, \dots, J_i) \end{aligned} \right\}$$

ここで、 γ_{ij} は機器の種類および容量の選択を表す0-1整数変数、 η_{ij} は設置台数を表す整数変数である。 N_{ij} は最大設置可能台数、 I は機器の種類数、 J_i は容量の候補数、添字 i および j はそれぞれ機器の種類および容量の指標である。次に、各期間における機器の性能特性として、入出力エネルギー流量間の関係を次式によって表す。

$$\left. \begin{aligned} y_i(k) &= \sum_{j=1}^{J_i} p_{ij} \gamma_{ij} x_i(k) + \sum_{j=1}^{J_i} q_{ij} \gamma_{ij} \delta_i(k) \\ \sum_{j=1}^{J_i} \underline{x}_{ij} \gamma_{ij} \delta_i(k) &\leq x_i(k) \leq \sum_{j=1}^{J_i} \bar{x}_{ij} \gamma_{ij} \delta_i(k) \\ \delta_i(k) &\leq \sum_{j=1}^{J_i} \eta_{ij} \\ \delta_i(k) &\in \{0, 1, \dots, \max_{1 \leq j \leq J_i} N_{ij}\} \end{aligned} \right\} \quad (i = 1, 2, \dots, I; k = 1, 2, \dots, K) \quad (2)$$

ここで、 δ_i は運転台数を表す整数変数、 x_i および y_i はそれぞれ入力および出力エネルギー流量を表す連続変数である。 p_{ij} 、 q_{ij} 、 \underline{x}_{ij} 、および \bar{x}_{ij} はそれぞれ x_i と y_i の関係式の勾配、切片、 x_i の下限、および x_i の上限である。 K は期間数、引数 k は期間の指標である。ここでは、図4に示

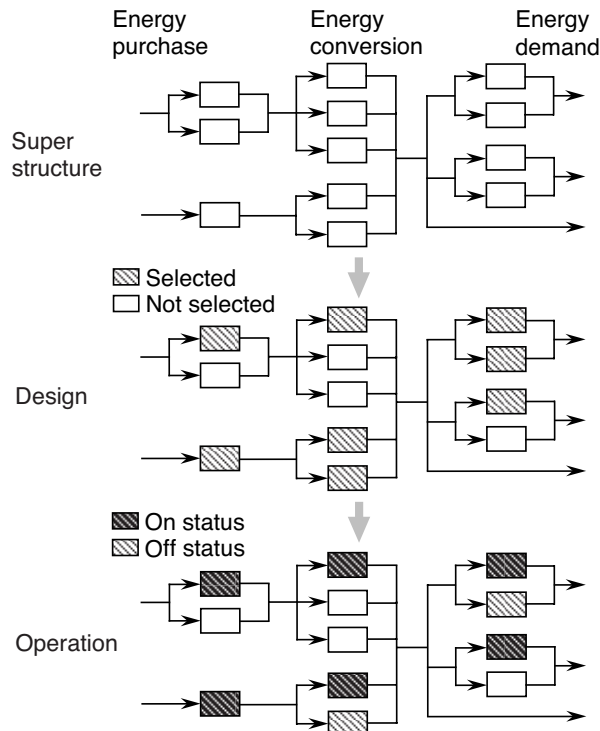


図1 スーパーストラクチャーの概念

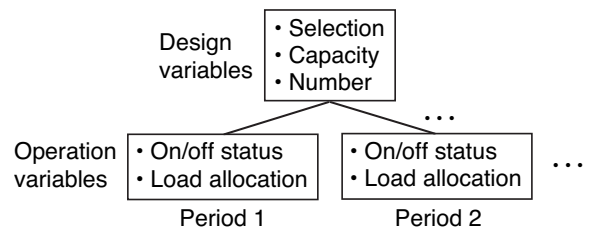


図2 設計および運用変数間の階層的関係

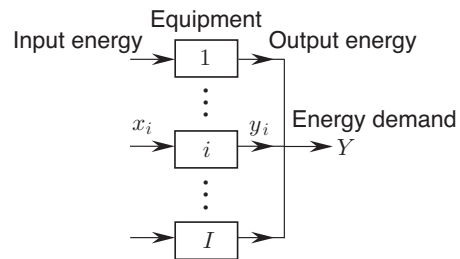


図3 単純なスーパーストラクチャーを有するシステム

すように、機器の性能特性に運転台数および容量による依存性を考慮している。その他、各期間におけるエネルギー需給関係を次式によって表す。

$$\sum_{i=1}^I y_i(k) = Y(k) \quad (k = 1, 2, \dots, K) \quad (3)$$

ここで、 Y はエネルギー需要量である。最後に、目的関数 z として年間総経費を採用し、次式によって表す。

$$z = \sum_{i=1}^I \left(R \sum_{j=1}^{J_i} c_{ij} \eta_{ij} + \varphi_i \sum_{k=1}^K T(k) x_i(k) \right) \quad (4)$$

ここで、 c_{ij} は機器の設備費、 R は資本回収係数、 φ_i は各入力エネルギーの従量料金単価、 T は各期間の年間相当日数である。

式(2)には γ_{ij} と x_i および γ_{ij} と δ_i の積による非線形項が含まれているが、片方の変数 γ_{ij} が0-1整数変数であるという特殊性を考慮して、線形化することができる[6]。

以上の結果、最適化問題は次式のようにベクトルで表現することができる。

$$\left. \begin{aligned} \min. \quad & z = f_0(\boldsymbol{\eta}) + \sum_{k=1}^K f_k(\boldsymbol{\delta}(k), \boldsymbol{x}(k)) \\ \text{sub. to } & \mathbf{g}_0(\boldsymbol{\eta}) \leq \mathbf{0} \\ & \mathbf{g}_k(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\delta}(k), \boldsymbol{x}(k)) \leq \mathbf{0} \quad (k = 1, 2, \dots, K) \\ & \mathbf{h}_k(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\delta}(k), \boldsymbol{x}(k)) = \mathbf{0} \quad (k = 1, 2, \dots, K) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 $\boldsymbol{\eta}$ は γ_{ij} および η_{ij} から成る設計整数変数ベクトル、 $\boldsymbol{\delta}$ は δ_i から成る運用整数変数ベクトル、 \boldsymbol{x} は x_i, y_i 、および線形化のための変数から成る運用連続変数ベクトル、 f_0 は年間設備費、 f_k は各期間の年間運用費、 \mathbf{g}_0 は式(1)から成る不等式制約条件ベクトル、 \mathbf{g}_k は式(2)の第2および

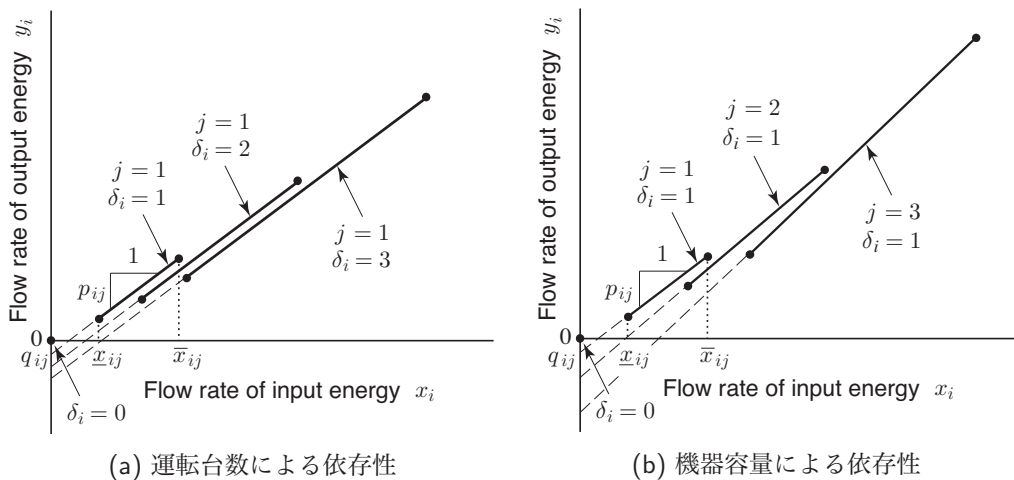


図4 機器性能特性のモデル化

び3式, ならびに線形化のための式から成る不等式制約条件ベクトル, \mathbf{h}_k は式(2)の第1式および式(3)から成る等式制約条件ベクトルである.

4. 最適化手法

4.1. 階層的最適化

設計および運用変数間の階層的關係を考慮し, 最適化計算を階層的に行う. この最適化計算の手順を図5に示す.

上位レベルでは, 運用整数変数を連続変数に緩和し, 分枝限定法によって設計整数変数の最適値を探索する. この最適設計問題は次式によって表される.

$$\left. \begin{aligned} \min. \quad & z = f_0(\boldsymbol{\eta}) + \sum_{k=1}^K f_k(\boldsymbol{\delta}(k), \mathbf{x}(k)) \\ \text{sub. to} \quad & \mathbf{g}_0(\boldsymbol{\eta}) \leq \mathbf{0} \\ & \mathbf{g}_k(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\delta}(k), \mathbf{x}(k)) \leq \mathbf{0} \quad (k = 1, 2, \dots, K) \\ & \mathbf{h}_k(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\delta}(k), \mathbf{x}(k)) = \mathbf{0} \quad (k = 1, 2, \dots, K) \\ & \text{with } \boldsymbol{\delta}(k) \text{ related to continuous variables} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

探索中に得られる暫定解は式(5)の元の最適化問題の暫定解になり得ないため, 最適設計問題を設計整数変数の候補解を生成するためのみに用いる. ただし, 後述する方法によって得られる元の最適化問題の暫定解の目的関数値を, 探索中の限定操作に用いる.

一方, 下位レベルでは, 上位レベルで生成された設計整数変数の候補解に対して, 各期間ごとに独立に, 分枝限定法によって運用整数および連続変数の最適値を求める. この最適運用問題は次式によって表される.

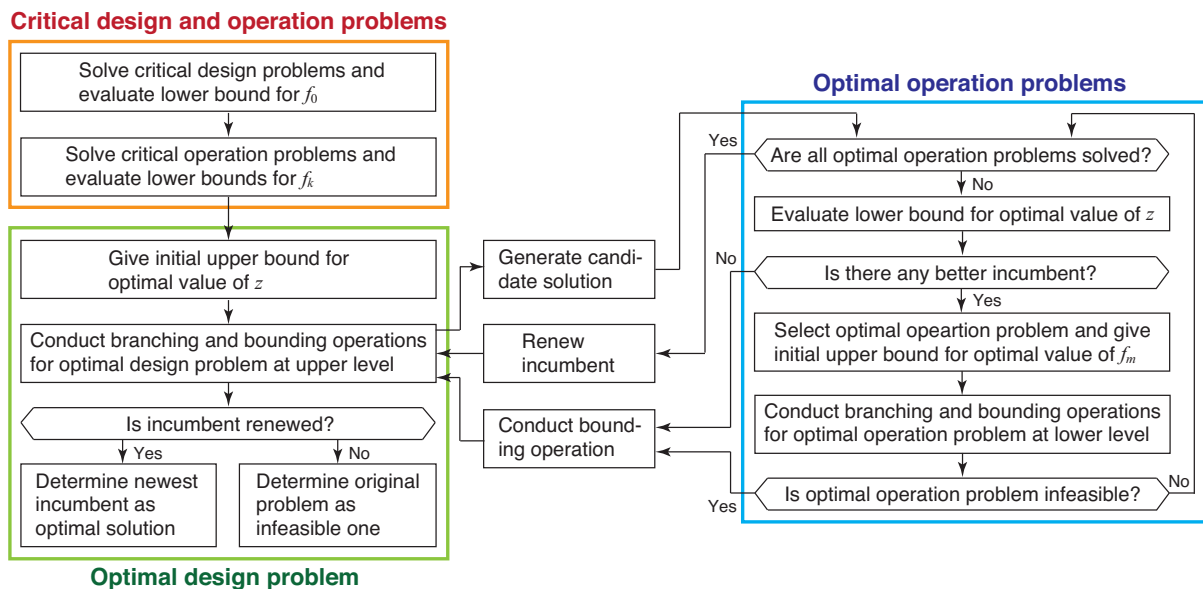


図5 設計および運用変数間の階層的關係を考慮した最適化計算の手順

$$\left. \begin{array}{l} \min. \quad f_k(\boldsymbol{\delta}(k), \boldsymbol{x}(k)) \\ \text{sub. to } \boldsymbol{g}_k(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\delta}(k), \boldsymbol{x}(k)) \leq \mathbf{0} \\ \quad \boldsymbol{h}_k(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\delta}(k), \boldsymbol{x}(k)) = \mathbf{0} \\ \text{with } \boldsymbol{\eta} \text{ given tentatively at upper level} \end{array} \right\} (k = 1, 2, \dots, K) \quad (7)$$

設計整数変数の候補解から f_0 を、最適運用問題の最適解から f_k を評価し、式(5)の元の最適化問題の目的関数 z を評価する。この目的関数値が暫定解の目的関数値 \tilde{z} より小さければ、設計整数変数の候補解を新しい暫定解として採用し、そうでなければ候補解を棄却する。

以上のように最適化計算を階層的に行うことによって、分枝限定操作を設計整数変数および各期間の運用整数変数ごとに独立に行うことができ、そのため図6に示すように列挙木の構造が変化し、これが最適化計算の効率化に繋がると考えられる。

4.2. 下界評価

最適化計算をより効率よく行うためには、目的関数値の良い下界を評価し、分枝限定法における限定操作を行い易くする必要がある。通常の方枝限定法では各分枝頂点において連続緩和問題を解き、その目的関数値を元の問題の目的関数値の下界として用いる。この下界の f_0 および f_k に対応する値をそれぞれ f_0^C および f_k^C と表す。ここでは、それに加えて、限界設計および運用問題と名付けた問題を定義し、それらの最適解の目的関数値に基づいて、元の問題の目的関数値の下界を導出する。限界設計問題を次式のように定義する。

$$\left. \begin{array}{l} \min. \quad f_0(\boldsymbol{\eta}) \\ \text{sub. to } \boldsymbol{g}_0(\boldsymbol{\eta}) \leq \mathbf{0} \\ \quad \boldsymbol{g}_k(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\delta}(k), \boldsymbol{x}(k)) \leq \mathbf{0} \\ \quad \boldsymbol{h}_k(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\delta}(k), \boldsymbol{x}(k)) = \mathbf{0} \end{array} \right\} (k = 1, 2, \dots, K) \quad (8)$$

一方、限界運用問題を次式のように定義する。

$$\left. \begin{array}{l} \min. \quad f_k(\boldsymbol{\delta}(k), \boldsymbol{x}(k)) \\ \text{sub. to } \boldsymbol{g}_0(\boldsymbol{\eta}) \leq \mathbf{0} \\ \quad \boldsymbol{g}_k(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\delta}(k), \boldsymbol{x}(k)) \leq \mathbf{0} \\ \quad \boldsymbol{h}_k(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\delta}(k), \boldsymbol{x}(k)) = \mathbf{0} \end{array} \right\} (k = 1, 2, \dots, K) \quad (9)$$

これらの問題は各期間ごとに定義されており、該当期間以外の制約条件を考慮していない。ま

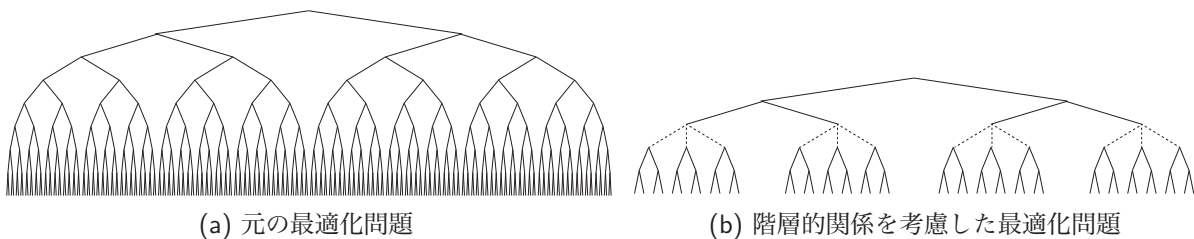


図6 列挙木の構造

た、目的関数はそれぞれ f_0 および f_k のみである。したがって、これらは設計整数変数と 1 期間の運用整数および連続変数のみを含む問題であり、通常の MILP の分枝限定法によって容易に解くことができる。 f_0 の下界として式(8)による K 個の最適解の目的関数値の中から最大値を、また f_k の下界として式(9)による K 個の各最適解の目的関数値を採用し、それぞれ \underline{f}_0^D および \underline{f}_k^O と表す。

以上のように、連続緩和問題と限界設計および運用問題の下界は、 f_0 および f_k ともに独立に評価することができるため、より有効な値として大きい方を採用する。

4.3. 限定操作

階層的な最適化計算において、上記の下界を利用し、限定操作を次のように行う。

まず、上位レベルの最適設計問題においては、各分枝頂点において目的関数値の下界を次式のように評価する。

$$\underline{z} = \max(\underline{f}_0^C, \underline{f}_0^D) + \sum_{k=1}^K \max(\underline{f}_k^C, \underline{f}_k^O) \quad (10)$$

この下界が暫定解の目的関数値 \tilde{z} よりも大きければ、限定操作を行うことができる。

一方、下位レベルの最適運用問題においては、各期間の最適運用問題を解く前に目的関数値の下界を次式のように評価する。

$$\underline{z} = f_0 + \sum_{k \in S} f_k + \sum_{k \in U} \max(\underline{f}_k^C, \underline{f}_k^O) \quad (11)$$

ここで、 S および U はそれぞれ既に解かれた最適運用問題およびまだ解かれていない最適運用問題の指標の集合を表す。なお、右辺の第 1 項は設計整数変数の候補解によって、また第 2 項は既に解かれた最適運用問題の最適解によって評価する。この下界が暫定解の目的関数値 \tilde{z} よりも大きければ、限定操作を行うことができる。なお、各期間の最適運用問題を順次解いていくに従って、第 3 項の減少値以上に第 2 項の増大値が大きくなり、そのため下界も増大し、限定操作を行える可能性が高まることになる。

各期間の最適運用問題を解く前に、最適運用問題における目的関数最適値の上界を評価することができる。最適運用問題を効率よく解くことができる。この上界 \tilde{f}_m は、元の問題の暫定解の目的関数値 \tilde{z} 、ならびに式(11)から該当の最適運用問題に対応する項を除いた各項の値を用いて、次式のように評価することができる。

$$\tilde{f}_m = \tilde{z} - \left(f_0 + \sum_{k \in S} f_k + \sum_{k \in U \setminus \{m\}} \max(\underline{f}_k^C, \underline{f}_k^O) \right) \quad (12)$$

4.4. ソルバーへの実装

以上に提案した最適化手法を公開および商用の MILP ソルバーに実装する。

公開の MILP ソルバーとして文献 [10] に掲載されているものを利用し、上位および下位レベルにおけるそれぞれ最適設計および運用問題の最適化計算に適用するために2つのプログラムを準備する。また、それらを接続して、相互に情報交換を行うためのプログラムを作成する。式(10)による限定操作は上位レベルの最適化計算プログラムに組込む。また、式(11)による限定操作は情報交換用のプログラムに組込む。さらに、式(12)による上界評価は下位レベルの最適化計算プログラムに組込む。

商用の MILP ソルバーについては、強力な MILP ソルバーの一つである CPLEX [8] を選定し、それを上位レベルにおける最適設計問題で利用する。下位レベルにおける最適運用問題でも CPLEX を利用できるが、問題が小規模であるため、ここでは上記の公開の MILP ソルバーを利用する。それらを接続して、相互に情報交換を行うためのプログラムには、CPLEX に備わっている incumbent callback を利用する。これは、通常暫定解が見つかった際に呼び出される。ここでは、その際に、設計整数変数の候補解である暫定解を棄却し、その代わりに、公開の MILP ソルバーを呼出して下位レベルにおける最適運用問題を解き、目的関数値を評価する。また、その結果に応じて、暫定解の更新あるいは限定操作を行う。なお、CPLEX では式(10)による限定操作を組込むことはできない。その代わりに、incumbent callback において最適運用問題を解く前に式(11)による限定操作を行うことができる。一方、CPLEX では同一の設計整数変数の候補解が複数回生成されてしまうので、それを回避するための制約条件 [1, 13] を順次追加する。これは CPLEX に備わっている cut callback および lazy constraint callback によって行う。

5. 適用事例

5.1. 適用事例 1

まず、公開の MILP ソルバーを利用し、小規模かつ例示的な最適化問題に適用した事例について述べる。

対象システムとして、図7に示す2種類の機器から成るガスエンジンコージェネレーションシステムを取上げる。表1に示すように、2種類の機器ともに、容量を2つの候補から選択し、最大設置可能台数を2台とする。機器の選択とともに、電力および都市ガスの最大契約量を決定する必要があるが、本手法では設計変数を整数変数に限定しているため、最大契約量の候補値を離散的に扱い、整数変数を用いて表す。エネルギー需要量の変化を考慮するために、年間に3代表日を設定し、各代表日を3, 6, および12のサンプリング時間に分割して、3つの場合について検討する。設計0-1整数および整数変数の数はそれぞれ4および6, また運用整数変数の数は上記の3, 6, および12のサンプリング時間の場合についてそれぞれ18, 24, および72である。本手法においては、ケースIとして式(10)~(12)による限定操作を行わない場合、ケースIIとして式(11)および(12)のみによる限定操作を行う場合、ならびにケースIIIとして式(10)~(12)による限定操作を行う場合について検討し、限定操作の効果を調べる。なお、最適化計

算を MacBook Air OS X 10.6.7 上で行う。

表2は各期間数において本手法によって得られた最適解のシステム構成を示す。表3は各期間数および各ケースにおける目的関数最適値および計算時間を示す。また、同一の公開のMILPソルバーを用いて通常の最適化計算を行った場合の結果も示す。このソルバーは強力ではないため、通常の最適化計算には長時間を要し、制限時間内に最適解を求められない場合も生じた。一方、本手法によって、最適解を極めて短い時間で導出できるようになる。また、式(10)~(12)による限定操作が有効に働き、計算時間を短縮できる。表4は、その根拠として、各期間数において生成し得る設計整数変数の候補解の全数、上位レベルで除去された数、および下位レベルで除去された数、更新された暫定解の数、ならびに最適運用問題の全数および実際に解かれた数を示す。限定操作によって上位および下位レベルにおいてそれぞれ67~70および28~30%の候補解が除去され、11~16%の最適運用問題しか解く必要がなくなる。

5.2. 適用事例2

次に、商用のMILPソルバーを利用し、大規模かつ実用的な最適化問題に適用した事例につ

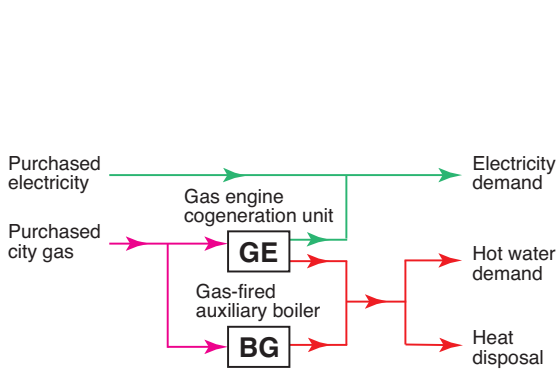


図7 適用事例1における対象システム（ガスエンジンコージェネレーションシステム）

表1 適用事例1における候補機器

Equipment	Capacity/performance*	Candidate	
		#1	#2
Gas engine cogeneration unit	Max. power output kW	25.0	35.0
	Max. hot water output kW	38.4	52.7
	Power generating efficiency	0.335	0.340
	Heat recovery efficiency	0.515	0.511
Gas-fired auxiliary boiler	Max. hot water output kW	99.0	198.0
	Thermal efficiency	0.886	0.900

*At rated load level

表2 適用事例1における最適解のシステム構成

Number of periods	Equipment/utility	Candidate	Number	Capacity
9 (3×3)	Gas engine cogeneration unit	#1	2	50.0 kW
	Gas-fired auxiliary boiler	-	-	-
	Electricity maximum demand	-	-	50.0 kW
	City gas maximum demand	-	-	13.0 Nm ³ /h
18 (3×6)	Gas engine cogeneration unit	#1	1	25.0 kW
	Gas-fired auxiliary boiler	#1	1	99.0 kW
	Electricity maximum demand	-	-	80.0 kW
	City gas maximum demand	-	-	10.0 Nm ³
36 (3×12)	Gas engine cogeneration unit	#1	1	25.0 kW
	Gas-fired auxiliary boiler	#1	1	99.0 kW
	Electricity maximum demand	-	-	80.0 kW
	City gas maximum demand	-	-	13.0 Nm ³ /h

表3 適用事例1における解の比較

Number of periods	Conventional method		Proposed method		
	Solution and objective ×10 ⁶ yen/y	Computation time ^s	Solution and objective ×10 ⁶ yen/y	Case	Computation time ^s
9 (3×3)	Optimal 10.45	3072.4	Optimal 10.45	I	1.9
				II	1.3
				III	0.7
18 (3×6)	Feasible 10.54	3600.0*	Optimal 10.44	I	5.3
				II	4.5
				III	2.0
36 (3×12)	Feasible 10.90	3600.0*	Optimal 10.49	I	9.2
				II	7.4
				III	4.6

*Attains limit for computation time

表4 適用事例1における候補解および最適運用問題の数

Number of periods	Number of candidate solutions				Number of optimal operation problems	
	All	Removed at upper level	Removed at lower level	Renewed incumbents	All	Solved
9 (3×3)	246	171	73	2	2214	347
18 (3×6)	203	136	61	6	4428	663
36 (3×12)	190	133	54	3	8856	1052

いて述べる。

対象システムとして、図8に示す7種類の機器から成るガスタービンコージェネレーションシステムを取上げる。表5に示すように、受電設備およびポンプを除く5種類の機器について、容量を表に示す数の候補から選択し、最大設置可能台数を4台とする。なお、ガスタービン発電機と排熱回収ボイラは一体として選択する。ここでも、電力および都市ガスの最大契約量の候補値を離散的に扱い、整数変数を用いて表す。また、受電設備の容量は電力の最大契約量に等しいものとする。年間に3代表日を設定し、各代表日を24のサンプリング時間に分割する。設計0-1整数および整数変数の数はそれぞれ22および24、また運用整数変数の数は288である。本手法においては、ケースIとして式(11)および(12)による限定操作を行わない場合、な

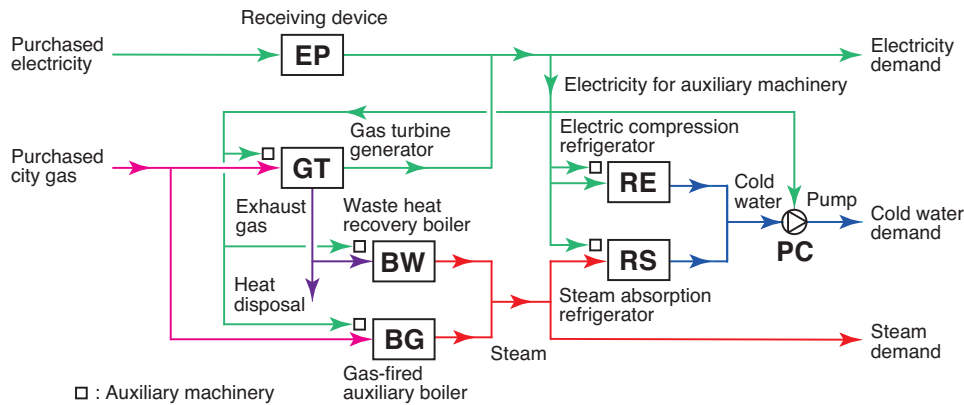


図8 適用事例2における対象システム（ガスタービンコージェネレーションシステム）

表5 適用事例2における候補機器

Equipment	Capacity/performance*	Candidate			
		#1	#2	#3	#4
Gas turbine cogeneration unit	Max. power output MW	1.29	1.60	2.00	2.40
	Max. steam output MW	5.69	3.34	4.10	4.57
	Power generating efficiency	0.140	0.173	0.169	0.179
	Heat recovery efficiency	0.617	0.362	0.347	0.341
Gas-fired auxiliary boiler	Max. power output MW	2.93	3.50	3.54	4.36
	Max. steam output MW	6.44	6.97	6.89	8.92
	Power generating efficiency	0.256	0.271	0.273	0.273
	Heat recovery efficiency	0.563	0.540	0.531	0.559
Electric compression refrigerator	Max. cooling output MW	2.82	3.52	4.22	5.28
	Coefficient of performance	4.57	4.73	4.76	5.04
Steam absorption refrigerator	Max. cooling output MW	3.46	5.18	6.91	8.64
	Coefficient of performance	1.20	1.20	1.20	1.20

*At rated load level

表6 適用事例2における最適解のシステム構成

Equipment/utility	Candidate	Number	Capacity
Gas turbine cogeneration unit	#8	3	13.08 MW
Gas-fired auxiliary boiler	#2	1	7.86 MW
Electric compression refrigerator	#1	1	5.28 MW
Steam absorption refrigerator	#3	4	20.72 MW
Receiving device	-	-	4.00 MW
Electricity maximum demand	-	-	4.00 MW
City gas maximum demand	-	-	$4.50 \times 10^3 \text{ Nm}^3/\text{h}$

表7 適用事例2における解の比較

Conventional method		Proposed method	
Solution and objective	Computation time	Solution and objective	Computation time
$\times 10^9 \text{ yen/y}$	s	$\times 10^9 \text{ yen/y}$	s
Feasible	9167.2*	Optimal	I
1.451		1.451	II
			945.1
			529.4

*Attains limit for computation memory

表8 適用事例2における候補解および最適運用問題の数

Number of candidate solutions			Number of optimal operation problems		
All	Removed before lower level	Removed at lower level	Renewed incumbents	All	Solved
636	171	463	14	45792	15708

らびにケース II として式(11)および(12)による限定操作を行う場合について検討し、限定操作の効果を調べる。なお、最適化計算を MacBook Air OS X 10.6.7 上で行う。

表 6 は本手法によって得られた最適解のシステム構成を示す。表 7 は各ケースにおける目的関数最適値および計算時間を示す。また、同一の商用の MILP ソルバーを用いて通常の最適化計算を行った場合の結果も示す。ただし、設計整数変数が運用整数変数に優先して分枝変数として選択されるように、関連するパラメータの値を設定した。このソルバーは強力であるが、通常の最適化計算には極めて長い時間を要し、途中で記憶容量の制限を超えたため、停止した。そのため、結果として得られた暫定解は最適解に一致したが、最適解の保証を行うことができなかった。一方、本手法によって、最適解を短時間で導出できるようになる。また、式(11)および(12)による限定操作が有効に働き、計算時間を短縮できる。表 8 は、その根拠として、生成し得る設計整数変数の候補解の全数、下位レベル直前で除去された数、および下位レベルで除去された数、更新された暫定解の数、ならびに最適運用問題の全数および実際に解かれた数を示す。限定操作によって下位レベル直前および下位レベルにおいてそれぞれ 26 および 72 %以上の候補解が除去され、35 %未満の最適運用問題しか解く必要がなくなる。

6. おわりに

本稿では、MILP に基づく分散型エネルギーシステムの最適設計に関して、最近著者らが取り組んできた設計および運用変数間の階層的関係を考慮することによって効率的に最適化計算を行うための手法について紹介した。特に、限界設計および運用問題によって目的関数最適値の有効な下界を評価し、これを利用して両階層レベルにおいて限定操作を行う方法を提示した。また、本手法を公開および商用の MILP ソルバーに実装し、特に後者によって実用的な大規模な問題にも適用できるようにした。さらに、例示的および実用的な適用事例を通して、本手法の妥当性および有効性を示した。

今後の研究の展開として以下のような内容を考えている。

- (1) 分散型エネルギーシステムにおいては、エネルギー変換機器だけではなく蓄エネルギー機器が導入されることがある。その場合には、エネルギー需要量の変化あるいは蓄エネルギー機器の使用の周期に対応する複数の期間に渡る運用計画が必要となり、紹介した手法では最適運用問題ならびに限界設計および運用問題の規模が増大する。このような場合における手法の適用可能性を検討したい。
- (2) 設計支援という観点から、最適解だけではなく K -ベスト解を導出し、意思決定のためにより多くの情報を提供することが重要である。 K -ベスト解を導出するためには、通常は以前に生成された解を除外するための制約条件 [1] を順次追加しながら、生成したい解の個数に対応する回数だけ最適化計算を反復する必要がある [5, 16]。紹介した手法では 1 回のみの最適化計算によって K -ベスト解を導出することが可能であり、その有効性を検討したい。
- (3) 分散型エネルギーシステムの性能はエネルギー需要量に大きく左右されるが、その設計時

においてはエネルギー需要量は推定するしかなく、不確実性を有している。従来よりエネルギー需要量の不確実条件下においてミニマックス機会損失基準による分散型エネルギーシステムのロバスト最適設計法を提案し、線形計画モデルのみを扱ってきた [19]。最近ロバスト最適設計法の MILP モデルへの拡張を行っており、その最適化計算における紹介した手法の適用可能性を検討したい。

- (4) 紹介した手法を分散型エネルギーシステム的设计実務に利用するには、手法としての汎用性を確保するだけでは不十分である。設計対象システムの最適化計算に必要なプログラムおよび入力データを自動的に生成できるようにする必要がある。また、それを支援するためのユーザインタフェースも必要不可欠である。このような目的で従来より開発してきた最適設計支援汎用システム OPS-Design [22] に紹介した手法を実装したい。
- (5) 分散型エネルギーシステム以外の各種システムの最適設計問題においても、設計および運用変数が類似の階層的関係を有していると考えられる。機会があれば、紹介した手法を各種システムの最適設計に適用したい。

謝辞

紹介した手法の商用の MILP ソルバーへの実装については、Zuse Institute Berlin 品野勇治氏に共同研究を通して協力頂いた。また、商用の MILP ソルバーの使用については、IBM アカデミック・イニシャチブの支援を受けた。記して謝意を表する。

参考文献

- [1] E. Balas and R. Jeroslow: Canonical cuts on the unit hypercube, *SIAM Journal on Applied Mathematics* **23-1** (1972), 61–69.
- [2] D. Buoro, M. Casisi, A. De Nardi, P. Pinamonti, and M. Reini: Multicriteria optimization of a distributed energy supply system for an industrial area, *Energy* **58** (2013), 128–137.
- [3] D. Buoro, M. Casisi, P. Pinamonti, and M. Reini: Optimal synthesis and operation of advanced energy supply systems for standard and domestic home, *Energy Conversion and Management* **60** (2012), 96–105.
- [4] M. Carvalho, L. M. Serra, and M. A. Lozano: Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints, *Energy* **36-6** (2011), 3779–3790.
- [5] S. Fazlollahi, P. Mandel, G. Becker, and F. Maréchal: Methods for multi-objective investment and operating optimization of complex energy systems, *Energy* **45-1** (2012), 12–22.
- [6] F. Glover: Improved linear integer programming formulations of nonlinear integer problems, *Management Science* **22-4** (1975), 455–460.
- [7] S. Horii, K. Ito, P. S. Pak, and Y. Suzuki: Optimal planning of gas turbine co-generation plants based on mixed-integer linear programming, *International Journal of Energy Research* **11-4** (1987), 507–518.
- [8] IBM ILOG CPLEX Optimization Studio V12.5.1, <http://pic.dhe.ibm.com/infocenter/cosinfoc/v12r5/index.jsp>.
- [9] R. R. Iyer and I. E. Grossmann: Synthesis and operational planning of utility systems for multiperiod operation, *Computers and Chemical Engineering* **22-7-8** (1998), 979–993.
- [10] J. L. Kuester and J. H. Mize: *Optimization Techniques With FORTRAN*, McGraw-Hill, New York,

1972.

- [11] M. A. Lozano, J. C. Ramos, M. Carvalho, and L. M. Serra: Structure optimization of energy supply systems in tertiary sector buildings, *Energy and Buildings* **41-10** (2009), 1063–1075.
- [12] M. A. Lozano, J. C. Ramos, and L. M. Serra: Cost optimization of the design of CHCP (combined heat, cooling and power) systems under legal constraints, *Energy* **35-2** (2010), 794–805.
- [13] J. H. Owen and S. Mehrotra: On the value of binary expansions for general mixed-integer linear programs, *Operations Research* **50-5** (2002), 810–819.
- [14] S. A. Papoulias and I. E. Grossmann: A structural optimization approach in process synthesis—I: utility systems, *Computers and Chemical Engineering* **7-6** (1983), 695–706.
- [15] A. Piacentino, C. Barbaro, F. Cardona, R. Gallea, and E. Cardona: A comprehensive tool for efficient design and operation of polygeneration-based energy grids serving a cluster of buildings, part I: description of the method, *Applied Energy* **111** (2013), 1204–1221.
- [16] P. Voll, M. Hennen, C. Klaffke, M. Lampe, and A. Bardow: Exploring the near-optimal solution space for the synthesis of distributed energy supply systems, *Chemical Engineering Transactions* **35-1** (2013), 277–282.
- [17] P. Voll, C. Klaffke, M. Hennen, and A. Bardow: Automated superstructure-based synthesis and optimization of distributed energy supply systems, *Energy* **50** (2013), 374–388.
- [18] T. Wakui and R. Yokoyama: Optimal structural design of residential cogeneration systems in consideration of their operating restrictions, *Energy* **64** (2014), 719–733.
- [19] R. Yokoyama, K. Fujiwara, M. Ohkura, and T. Wakui: A revised method for robust optimal design of energy supply systems based on minimax regret criterion, *Energy Conversion and Management* **84** (2014), 196–208.
- [20] R. Yokoyama, Y. Hasegawa, K. Ito: A MILP decomposition approach to large scale optimization in structural design of energy supply systems, *Energy Conversion and Management* **43-6** (2002), 771–790.
- [21] R. Yokoyama and K. Ito: Optimal design of gas turbine cogeneration plants in consideration of discreteness of equipment capacities, *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* **128-2** (2006), 336–343.
- [22] R. Yokoyama and K. Ito: Performance evaluation of gas turbine cogeneration plants using a design optimization tool: OPS-Design, *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2006*, Paper No. GT2006-90611 (2006), 1–10.
- [23] R. Yokoyama and S. Ose: Optimization of energy supply systems in consideration of hierarchical relationship between design and operation, *Proceedings of the 25th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, (2012), 389–1–13.
- [24] R. Yokoyama, Y. Shinano, S. Taniguchi, M. Ohkura, and T. Wakui: Optimal design of energy supply systems by MILP branch and bound method in consideration of hierarchical relationship between design and operation, *ZIB-Report*, Report No. 14-09 (2014), 1–42.
- [25] Z. Zhou, P. Liu, Z. Li, and W. Ni: An engineering approach to the optimal design of distributed energy systems in China, *Applied Thermal Engineering* **53-2** (2013), 387–396.