エネルギー供給プラントの最適運用計画支援
汎用システムの開発*横山 良平^{*1}, 伊東 弘一^{*1}
神村 一幸^{*2}, 宮坂 房千加^{*2}Development of a General-Purpose Optimal Operational
Planning System for Energy Supply PlantsRyohei YOKOYAMA, Koichi ITO,
Kazuyuki KAMIMURA and Fusachika MIYASAKA

A general-purpose planning system is developed for assessing optimal operational strategies of energy supply plants. This system has three main functions: (a) data registration, (b) graphic editing, and (c) automatic programming and optimization calculation. Data on performance characteristics of equipment, tariff of input energy, energy demands, and ambient conditions are registered to form a data base that can be cited from a graphic editor. The graphic editor enables flexible and easy change of plant configurations for planners to investigate many alternative configurations of energy supply plants. Data on the plant configuration composed by the graphic editor are arranged automatically to carry out an optimization calculation, in which the operational strategy is determined so as to minimize the hourly operational cost subject to the energy demand requirement. Through an example, it is ascertained that the system is a useful tool for operational planning of energy supply plants from the viewpoints of rationality and time or labor reduction.

Key Words: Design Engineering, Systems Engineering, CAD, Energy Supply Plants, Operational Planning, Optimization, User Interface

1. 緒 言

コージェネレーションやヒートポンプなどのエネルギー供給プラントは一般に多種多様な機器から構成されており、その機器構成、機器台数、機器容量などを決定する設計計画や、運用方策を決定する運用計画においては、数多くの代替案が存在する。そのため、プラント計画者は種々の代替案を作成・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をしばしば要求される。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。

著者らは、コージェネレーション・プラントを対象に、各種最適化手法を適用して上述の設計・運用計画を合理的に行う方法を開発した^{(1)~(4)}。この最適設計・運用計画法においては、それぞれ機器容量やユーティリティ最大契約量、および機器の運転・停止条件

や負荷レベルなど数量化が比較的容易なものを決定変数として考慮した。しかしながら、機器構成や機器台数のようなプラントの「形態(Configuration)」まで最適化することは非常に困難である。なぜならば、形態を最適化しようとすれば、すべての形態の代替案を包含した数学モデルを作成する必要がある、その結果最適化問題の規模が莫大なものになるからである。したがって、実用的観点に立てば、プラントの形態に関しては直接最適化を行わず、各種代替案を作成・評価・比較し、その中から優れた案を選定するのが効率的であると考えられる。

このような場合、各種代替案の検討において、いかに大量のデータを系統的・自動的に処理し、計画の時間短縮化および省力化を計って行くかが基本的な重要となる。著者らはこれを目的として、ガスエンジンを主機とするコージェネレーション・プラントを対象に最適運用計画支援システムを開発した⁽¹⁾。しかしながら、このシステムでは検討可能なプラント構成が予め定められており、その範囲内で機器台数や機器容量を自由に変更できるが、機器構成までは柔軟に変更できないという欠点がある。そこで本研究では、機器構成に関する各種代替案についても柔軟かつ容易に検討

* 原稿受付 平成3年10月21日。

^{*1} 正員、大阪府立大学工学部(●593 堺市学園町1-1)。^{*2} 山武ハネウエル(株)ビルシステム事業部(●150 東京都渋谷区渋谷2-12-19)。

できるように、各種エネルギー供給プラントの最適運用計画を支援するための汎用システムを開発した。

エネルギー供給プラントの計画支援システムとしては、他にもいくつか開発例がある^{(5)~(8)}。しかしながら、これらは最適化計算機能あるいはユーザ・インタフェース機能が不十分である。そこで本研究では、著者らが提案した最適化計算の機能に加え、ユーザ・インタフェース機能を兼ね備えた汎用システムを開発した。ユーザ・インタフェース機能としては、特にグラフィック・エディタ機能を導入し、プラント構成をグラフィック画面上で柔軟かつ容易に作成・変更できるようにした。また、それによって入力された各種データに基づいて最適化計算を自動的に実行できるようにし、グラフィックス機能と最適化計算機能を有機的に結合した。

2. エネルギー供給プラントの運用計画

2.1 運用計画の位置付け エネルギー供給プラントの運用計画は、一般に図1に示す一連の計画過程の一つとして実行される。各過程の概要を以下に示す。

(a) エネルギー需要の推定 エネルギー供給対象となる地域や建物について、電力、冷・暖房、給

湯、蒸気などのエネルギー需要の種類および量を推定する。推定の対象となるエネルギー種は、地域や建物で需要家が最終的に使用するものである。

(b) 環境条件の推定 エネルギー供給プラントの各種構成機器の中には、ガスタービンやヒートポンプなど性能特性が外気温や水温などの環境条件に大きな影響を受けるものがある。そこで、性能特性の環境条件依存性を考慮するために、対象地域における環境条件を推定する。

(c) プラント基本構成案の作成 エネルギー需要の種類と量を参考にしながら、エネルギー供給プラントの構成機種とエネルギー・フローの代替案を作成する。

(d) 構成機器台数および容量代替案の作成 上記(c)の基本構成案において、構成機器の台数および容量を決定する。このとき、機器の定格および部分負荷時における入出力関係などの性能特性を評価する。

(e) 入力エネルギー料金体系および最大契約量代替案の作成 上記(d)の構成機器台数および容量に加えて、同時に電力や都市ガスなどの入力エネルギーの料金体系を選定し、その最大契約量を決定する。

(f) 運用計画 (a)~(e)によって与えられた条件の下で、プラント運用方策を算定する。この場合、推定されたエネルギー需要量の時間的変化に従って運用方策の時間的変化を求める。

(g) 代替案の評価 上記(f)の運用計画の結果に基づき、運用費や一次エネルギー消費量などのプラントの運用に関する評価を行う。また、設備費や入力エネルギー基本料金も評価し、総合的に経済性や省エネルギー性について検討する。

(h) 他の代替案についての検討 他の代替案について運用計画および評価を行い、互いに比較する。他の代替案を検討する場合には、再検討すべき項目に従って、(c)、(d)、(e)へ戻る。

2.2 最適化手法による運用計画 2.1節で述べたようなプラント構成に関する代替案だけではなく、運用方策に関しても数多くの代替案が存在する。従来の運用方策の決定法は、プラント構成機器の間に優先順位などの運用ルールを試行錯誤的に導入し、運用の自由度を減少させ、運用方策を唯一に決定しようとするものである。これに対して、著者らは数理計画法に基づく最適化手法による運用方策の決定法を提案した^{(1)~(3)}。これは、運用方策として各構成機器の運転・停止条件や負荷レベル、および各エネルギー・フロー

図1 エネルギー供給プラントの計画過程

量を数量化し、各構成機器の性能特性とエネルギー・バランスおよび需給関係の制約条件の下に、評価基準となるプラント全体の運用費や一次エネルギー消費量を最小化するように運用方策を決定する方法である。また、この最適化問題を一つの混合整数線形計画問題として定式化し、双対シンプレックス法と分枝限定法によって最適解を求める。

上記最適化手法による運用方策決定の具体的な処理過程を図2に示す。各処理の概要を以下に述べる。

(a) エネルギー・フロー図の作成 プラントの構成機器を描き、それらをエネルギー・フローを表す線で接続する。

(b) エネルギー量の定義 各機器の入出力エネルギー量および各エネルギー・フロー量などを表す記号を定義する。

(c) 機器性能特性の定式化 制約条件の一つとして、機器の入出力関係を(b)で定義した記号を用いて定式化する。

(d) エネルギー・バランスおよび需給関係の定式化 制約条件の一つとして、各エネルギー・フローについてエネルギー収支関係を(b)で定義した記号を用いて定式化する。

(e) 目的関数の定式化 目的関数として、入力エネルギーの従量料金による運用費、あるいは一次エネルギー消費量を(b)で定義した記号を用いて定式化する。

(f) シンプレックス表の作成 (c)～(e)の定式化に基づいて、双対シンプレックス法に対する入力データとなるシンプレックス表をマトリックス形式で作成する。

(g) 制御用プログラムの作成 各種データの入出力やエネルギー需要の時間的変化に対する運用方策の算定など、計算全体を制御するプログラムを作成する。

(h) 最適化計算 最後に最適化計算を行い、(b)で定義した各機器の入出力エネルギー量および各エネルギー・フロー量などの最適値を求める。

以上のように最適化手法を導入することによって、各構成機器間の運用ルールを適用することなく、合理的かつ系統的に運用計画を行うことができる。しかしながら、図2の処理を計画者がすべて手作業によって行うことは非効率的であり、最適化手法を導入しても短時間に種々のプラント構成代替案を比較・検討することは依然として困難である。そこで本研究では、最適化計算機能にユーザ・インタフェース機能を追加し、上述の運用計画を支援するための汎用システムを開発した。

3. 最適運用計画支援汎用システムの機能

本システムの機能として、以下に述べる3つの主要機能を設けた。

3.1 データ登録機能 各種データを事前にデータ・ベース的に登録し、運用計画を行う際に3.2節で述べるグラフィック・エディタから登録されているデータを選択し、運用計画の前提条件として利用できるようにした。この機能によって、プラント計画者の必要性に合ったシステムを構築することができる。

データの種類は以下の通りである。

(a) エネルギー種 様々な機器からなる種々のエネルギー供給プラントについて検討できるように、各種機器の入出力エネルギーの種類を登録する。

(b) 一般機種 入出力エネルギーの種類、および入出力関係を表す性能特性式の一般形を定義することによって、一般機種を登録する。

(c) 個別機器 一般機種の登録に加えて、一般機種で定義された性能特性式中のパラメータに具体的な数値を与えることによって、個別機器の性能特性を定義し登録する。また、性能特性値の環境条件依存性を考慮する場合には、上記パラメータを環境条件の関数として与える。

(d) 入力エネルギー料金 電力や都市ガスなどの入力エネルギーの料金単価は、季節的・時間的に

図2 最適運用計画過程

変化し非常に複雑であり、また種類も多い。ここでは、多種多様な入力エネルギー料金を登録し、その中から選択できるようにする。

(e) エネルギー需要 検討対象のエネルギー供給対象施設だけではなく、代表的な各種建物のエネルギー需要の種類と量をデータ・ベース的に登録する。

(f) 環境条件 外気温や水温などの環境条件を登録し、個別機器の性能特性の環境条件依存性を考慮する。

なお、エネルギー種および一般機種種の登録時に、運用計画用のデータだけではなく、グラフィック・エディタで利用するためのエネルギー種を表す色や機種を表すアイコンなどグラフィックス情報も登録する。

3.2 グラフィック・エディタ機能 運用計画を行うべきエネルギー供給プラントを柔軟かつ容易に定義するために、計算機のグラフィックス機能を利用し、一種のグラフィック・エディタを構築した。すなわち、エネルギー供給プラントを数値および文字情報で定義する代りに、エネルギー・フロー図を作成することによってグラフィックス情報で定義し、エネルギー・フロー図を操作することによって柔軟にプラント構成を作成・変更できるようにした。

グラフィック・エディタの画面構成を図3に示す。

また、その操作の概要を以下に述べる。

(a) 機器の設置 登録されている一般機種をアイコン表示してメニュー化し、その中からマウスで選択して機器をエネルギー・フロー図作成領域の適当な位置に配置する。

(b) エネルギー・フロー端末の設置 エネルギー・フロー端末としては、「購入」、「売却」、「需要」、および「廃棄」の各項目を準備し、必要に応じて各エネルギー・フローに対してこれらの項目の

図3 グラフィック・エディタの画面構成

図4 データの構成と処理の流れ

うち一つを割り当てる。

(c) エネルギー・フローによる接続 配置された機器およびエネルギー・フロー端末の間をエネルギー・フローを表す折線で接続する。エネルギー・フローによって基本的に機器の出力やエネルギー・フロー端末の「購入」と機器の入力や他のエネルギー・フロー端末とを接続するが、分岐あるいは合流する場合にはノードを配置し、それを通して間接的に接続する。

(d) 各種データの選択 3.1節で述べたように、各種データ（個別機器、入力エネルギー料金、エネルギー需要、環境条件）について登録されているものの中からそれぞれ一つを選択する。また、入力エネルギーの最大契約量など他の数値データを入力する。これらのデータは、エネルギー・フロー図に配置された機器やエネルギー・フロー端末のアイコンをクリックして表示される他のウィンドウから入力できるようにし、プラント計画者によるデータ入力を容易なものにした。

3.3 自動最適化計算機能 グラフィック・エディタによって定義されたエネルギー供給プラントの最適運用計画を自動的に行えるような機能を持たせた。すなわち、エネルギー・フロー図のグラフィックス情

報の解析によって、最適運用計画問題の定式化、それに基づく各種プログラムの作成、および最適化計算など、2.2節で述べた(b)～(h)の処理をすべて自動的に行う。これによって、計画者は最適化に必要な詳細な処理を行うことなく、短時間に効率的に運用計画を行える。また、最適運用計画法の採用によって、試行錯誤的な運用計画法に必要とされる運用ルールに関する処理のプログラムを作成する必要がないため、系統的に自動最適化計算を行うことができる。

上述の各種データの構成と、3つの主要機能によるデータ処理の流れを図4に示す。

なお、本システムは、UNIXワークステーション上でCおよびFORTRAN言語を用いて開発した。また、グラフィックス関係のソフトウェアとしてX-Window Version 11を使用した。

4. 適用例

本研究で開発したシステムを、ある地域冷暖房計画におけるガスタービン・コージェネレーション・プラントの最適運用計画に適用した。図5は、グラフィック・エディタを利用して描かれた対象プラントのエネルギー・フロー図である。プラントは、ガスタービン発電機2台(GT1, 2)、廃熱ボイラ2台(BW1, 2)、補助

図5 グラフィック・エディタによるエネルギー供給プラントの作成例
(ガスタービン・コージェネレーション・プラント)

(a) 電力供給配分 (8月代表日)

(b) 蒸気供給配分 (8月代表日)

図6 最適運用方策の例

ボイラ2台(BA1,2), 電動ターボ冷凍機1台(RE1), 蒸気吸収冷凍機3台(RS1~3), 冷却塔4台(CT1~4), およびポンプ1台(PP1)から構成されている。エネルギー・フロー端末としては、電力、都市ガス、水道水の「購入」、ガスタービンからの廃熱の「廃棄」、および電力、冷房、蒸気の「需要」が存在する。また、機器、エネルギー・フロー端末、およびノードを接続するエネルギー・フローには、エネルギー種を表す記号が付されている。Eは電力、FGは都市ガス、QXは廃熱、QSは蒸気、QCは冷水、QWは冷却水、Wは水道水をそれぞれ表す。

このプラントに対して、自動最適化計算機能によって最適運用方策の算定を行った。結果として得られた

最適運用方策の一例として、8月代表日のエネルギー需要に対する電力および蒸気供給配分の時間的変化をそれぞれ図6(a)および(b)に示す。

5. 結 言

エネルギー供給プラントの機器構成に関する各種代替案についての運用計画を支援するために、最適化計算機能とユーザ・インタフェース機能を兼ね備えた汎用システムを開発した。その特徴は以下の通りである。

(1) プラント構成機器の運用ルールに関する処理を行う必要がなく、合理的かつ系統的に運用方策を決定することができる。

(2) 各種データの登録機能によって、プラント計画者の必要性に合った支援システムを構築することができる。

(3) グラフィック・エディタ機能によって、プラント構成と関連データをグラフィック画面上で柔軟かつ容易に作成・変更できる。

(4) 自動最適化計算機能によって、最適化の詳細な処理を行うことなく、容易にプラントの最適運用方策を求めることができる。

以上より、本システムはエネルギー供給プラントの計画における時間短縮化および省力化に寄与するものと考えられる。

文 献

- (1) 伊東・堀井・片山, 機論, 53-491, C(1987), 1607.
- (2) 伊東・横山・松本・赤木, 機論, 54-499, C(1988), 773.
- (3) 伊東・横山・斯波, 空気調和・衛生工学会論文集, 42(1990), 69.
- (4) 横山・伊東・赤木, 機論, 56-522, C(1990), 519.
- (5) 伊藤・ほか3名, システムと制御, 24-7(1980), 453.
- (6) 小沢・ほか3名, 昭和57年電気学会全国大会講演論文集, (1982), 1809.
- (7) 江原・ほか2名, 機論, 820-13(1982), 271.
- (8) Preeco, P. E., ほか4名, *Comput. Chem. Eng.*, 11-3(1987), 279.