

原動力設備プラントの最適運用と適用事例

項 東輝(こう とうき)

川森 亨(かわもり とおる)

福山 良和(ふくやま よしかず)

普通論文

1 まえがき

電気・熱・蒸気・空気などのエネルギーを必要とする工場、事務所、病院、大型ビルなどにおいては、コージェネレーションシステム、ボイラ、冷凍機、コンプレッサなどさまざまな原動力設備が用いられている。これらの原動力設備プラントの運用においてエネルギー費用を含め年間多大な運用費用がかかっており、この運用費用の削減および近年脚光を浴びている環境負荷の低減、つまり原動力設備プラントの最適運用が大きな課題となっている。このような課題を解決するために、設備個々の効率化を図ると同時に、構成される設備全体の連携を考慮したトータル最適化

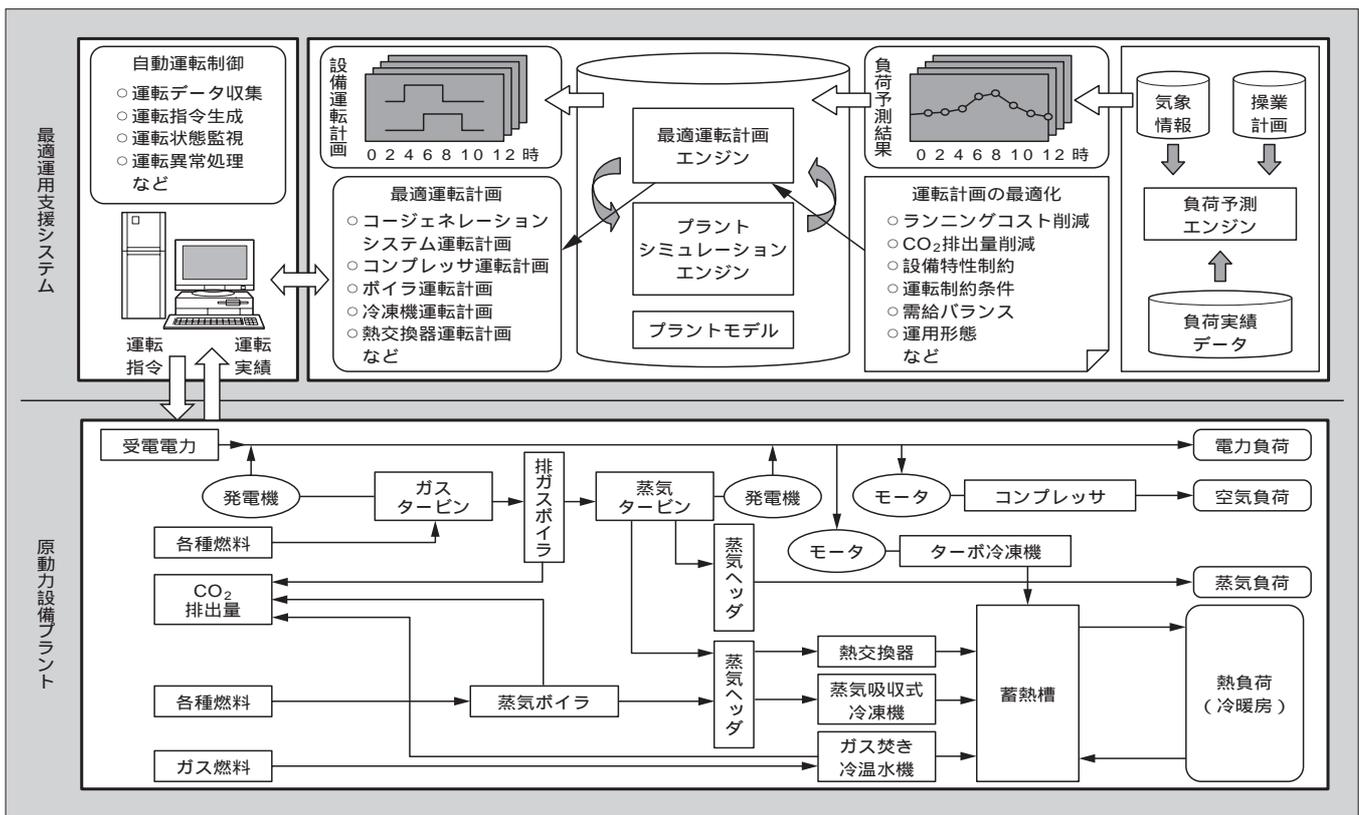
を行うことが非常に重要な手段である。

本稿では、原動力設備プラントの運用の全体最適化を実現する富士電機独自のソリューションおよびそれを支える各種要素技術の概要について説明する。また、トヨタ自動車(株)の生産工場の原動力設備プラントに対して、共同で最適運用制御システムを開発したので、その適用事例を紹介する。

2 原動力設備プラントの最適運用

図1には典型的な原動力設備プラントおよび最適運用支援システムの構成を示す。

図1 原動力設備プラントおよび最適運用支援システムの構成



項 東輝

企業情報・制御システムの企画・設計・開発に従事。現在、富士電機システムズ(株)のソリューション本部情報システム統括部ソリューション二部主任。工学博士。計測自動制御学会会員、電気学会会員。



川森 亨

トヨタ自動車(株)プラント・エンジニアリング部。



福山 良和

数理アルゴリズムを利用した顧客ソリューション研究開発業務に従事。現在、富士電機アドバンステクノロジー(株)情報通信制御部グループマネージャー。工学博士。電気学会会員、IEEE 会員。

一般的に電気・熱などを供給する個々の設備では効率化・自動化が図られているが、各種設備の運用は現状オペレーターの判断にゆだねられている場合が多く、プラント全体からみた場合必ずしも最適な運用とはなっていない。富士電機では長年培ってきた予測・最適化技術を生かした原動力設備プラントの最適運用支援ソリューションを提供している⁽¹⁾。

設備運用においては、各種負荷状況に応じて「いつ」「何を」「何台」「どのくらい」などを定める運用計画を立てなければならない。富士電機が提供する原動力設備の最適運用支援システムでは、オペレーターが介入することなく、システムティックに運用計画を立案し、下位の設備の制御システムとの連携により、計画立案から制御まで完全な自動化運転を実現する。

最適運用を実現するためには、大きく分けて負荷予測機能、プラントモデル機能および最適運用計画の決定機能という三つの基本機能が必要となる。

処理の流れとしては、まず各種負荷に対して、気象情報、操業計画、過去の実績などにより、未来方向の負荷予測を行う。

次に予測された各種負荷に基づいて、最適運用計画の決定機能により、各種エネルギーバランスおよび設備制約を考慮したうえで、運用費用および環境負荷の最小化を達成できるように運用計画の候補を生成する。

そしてプラントの設備特性および設備連携を模擬したプラントモデル化機能にこの運用計画の候補を与え、運用計画の妥当性をシミュレーションにより検証する。運用計画とプラントシミュレーションの繰返し計算により評価目標値が最小となる最適な運用計画を決定し、下位の制御システムに各設備の運転指令を与えて、運転の自動化を実現する。

以下では、原動力設備プラントの最適運用を支える富士電機の要素技術の概要を説明する⁽²⁾。

③ 最適運用における要素技術

3.1 負荷予測

電気、熱（空調用冷温水、湯など）、蒸気、工業用エアなどの負荷は、工場オフィスの操業または勤務形態や気象条件などに影響されたりするなど、さまざまな特性を有している。富士電機では高精度の負荷予測を実現するために、負荷特性に応じて構造化ニューロ、パターン予測方式、重回帰方式などさまざまな予測方法を適用している。

パターン予測方式は過去の負荷実績のうち、現在の状況に最も類似している実績を検索し、負荷予測値とする方式である。重回帰方式は気温・湿度などの感度を線形式で近似し利用する重回帰式による方法である。これらの予測手法に対して実用上高精度の予測結果を得るためにさまざまな補正オプション機能が開発・適用されている。

ニューラルネットワークは過去の実績を学習して非線形予測モデルを構築し、現在の状況に最も合う負荷を予測す

る方式である。最適なネットワーク構造が事前に得られないため試行錯誤的に学習しなければならず、内部がブラックボックスであるため、出力理由の説明が困難であったが、富士電機が独自に開発した構造化ニューラルネットワークは、内部を入力因子ごとに構造化することで出力理由の説明を可能とし、学習過程で不要な素子や結合を削除するため構造を最適化できる。

3.2 プラントのモデル化

プラントのモデル化においては、各種プラント設備の入力と出力の関係を入出力特性式として数式で表現する。例えば、ボイラであれば、燃料流量を入力として蒸気流量を出力するような特性式で表現する。この特性式は線形式で表現できる場合もあるが、二次式のような非線形の高次多項式によるモデルが必要な場合もある。また、数式では表現できないような現場の運用ルールなどを考慮する必要がある。例えば、設備の起動の優先順位や、設備の稼動時間の平滑化などがあり、運用上の制約条件として考慮が必要である。また、モデル化については、重回帰に基づいた線形式でプラント特性を近似する方法、非線形な特性を考慮するために、化学プラントのモデル化などで利用されている応答曲面法、非線形特性を容易にモデル化可能であるニューラルネットワークなどの方法を開発している。

3.3 運用計画の最適化

原動力設備プラントの最適運用の決定においては、以下のような課題がある。

- 1) 発電機、ボイラ、熱交換器などの出力は連続量であり、設備の起動停止などは起動か停止の2値の離散値となる。したがって、連続量と離散量を同時に扱うことが必要となる。
- 2) 前述のように、設備の特性として数式で表現できないものがある場合、これを考慮した最適化を行う必要がある。

課題1については、線形および非線形の混合整数計画問題を解く必要がある。従来の線形混合整数計画問題の場合、分枝限定法などの数理計画法を利用することが可能である。しかし、非線形混合整数計画問題については、従来、有効な方法が存在しなかった。これに対し、近年脚光をあびているメタヒューリスティクス（Meta-Heuristics：MH）と呼ばれる最適化技術は、非線形混合整数計画問題を容易に扱うことができ、原動力設備プラントの最適運用に有効である。

課題2については、従来の数理計画法ではすべて数式で表現し、図1の最適運用決定機能とプラントモデル化機能を同時に数学的に解かなければならなかったため、扱うことができなかった。これに対し、MHでは設備の特性を表現するプラントモデルと最適運用決定を完全に独立させることが可能であるため、プラントモデルは自由に作成することが可能である。

富士電機では、PSO（Particle Swarm Optimization）

をはじめ、GA (Genetic Algorithm) , SA (Simulated Annealing) , TS (Tabu Search) など、各種 MH 手法による最適化手法の適用技術を開発し、実システムへの適用を行っている。

4 適用事例

4.1 背景

トヨタ自動車(株)では長年にわたって、国内工場において省エネルギーと環境負荷の低減に貢献するコージェネレーションシステムを積極的に導入し、電気、熱、蒸気、工業用エアなどさまざまな形態のエネルギーを供給する原動力設備プラントの安全かつ効率的な運用におけるさまざまな課題に精力的に取り組み、豊富な運用経験やノウハウを蓄積してきた。2000年度から、2005年度の原動力総費用半減を目標に掲げ、運転のワンタッチ化、点検のレス化、監視のながら化および保全の適正化・長寿命化により運転保全費の低減を図っている。その中で今回、電気、熱、蒸気の各種供給エネルギーの相互作用をとらえて、プラント全体の最適化を図った最適運用計画により、エネルギー費用の低減、設備の完全自動運転による運転費用の低減を実現することを図っている。

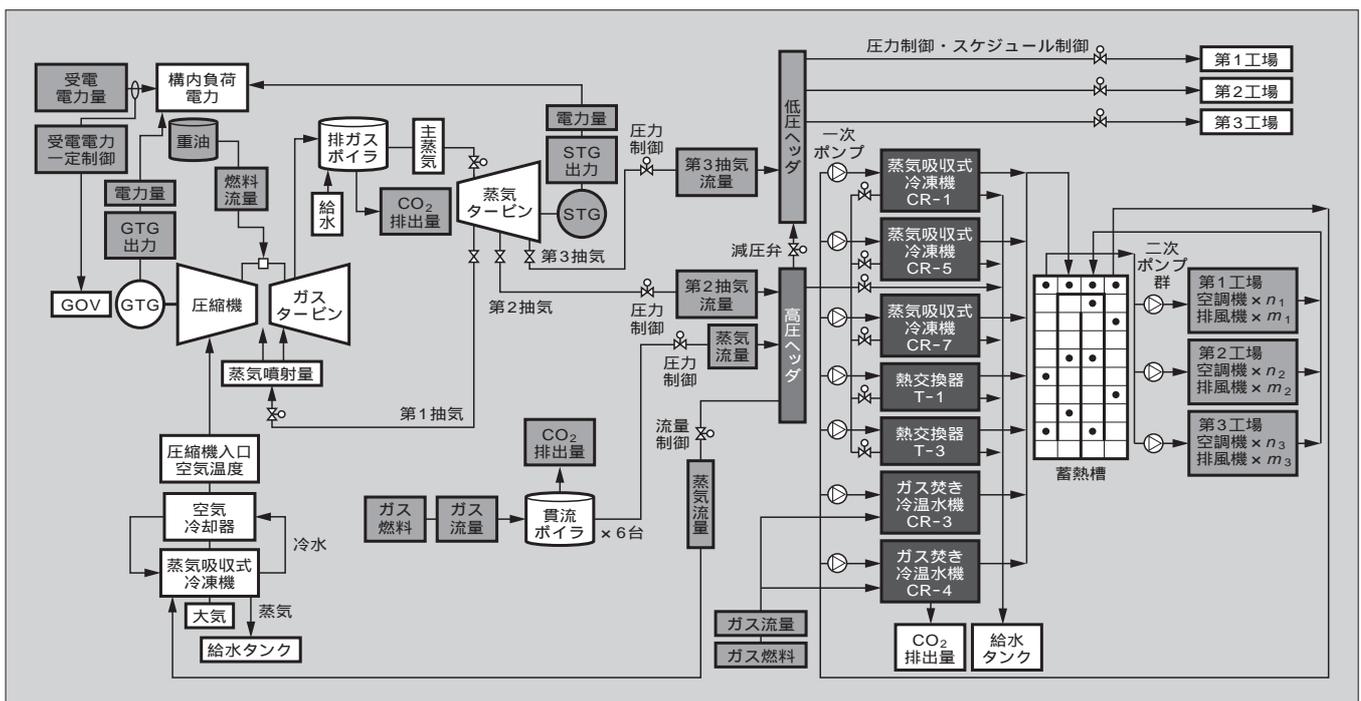
4.2 プラント構成

対象の原動力設備プラントの構成を図2に示す。

プラントの構成および運用形態の概要を以下にまとめる。

- 1) ガスタービン発電機 (Gas Turbine Generator : GTG) と蒸気タービン発電機 (Steam Turbine Generator : STG) からなるコンバインドサイクル発電システムを有する。

図2 原動力設備プラントの構成



- 2) 冷暖房用の冷温水は蓄熱槽から供給される。蓄熱槽の蓄熱は蒸気吸収式冷凍機 (3 台) , ガス焚 (だ) き冷温水機 (2 台) , 熱交換器 (2 台) を運転することにより行われている。
- 3) 蒸気式熱源設備の使用蒸気は主に蒸気タービンの抽気から供給され、不足分は貫流ボイラ (6 台) から供給される。
- 4) 熱源設備に蒸気を供給する以外に、生産用などの蒸気負荷がある。
- 5) 熱源設備の運用は、その日の気温、湿度、蓄熱槽の蓄熱量、工場の操業状況 (操業開始・停止時間、残業時間、1直稼働、2直稼働、休憩時間帯など) を運転員が過去の経験をベースに運転操作 (設備の入・切操作、蒸気弁の開閉・調節) を行っていた。

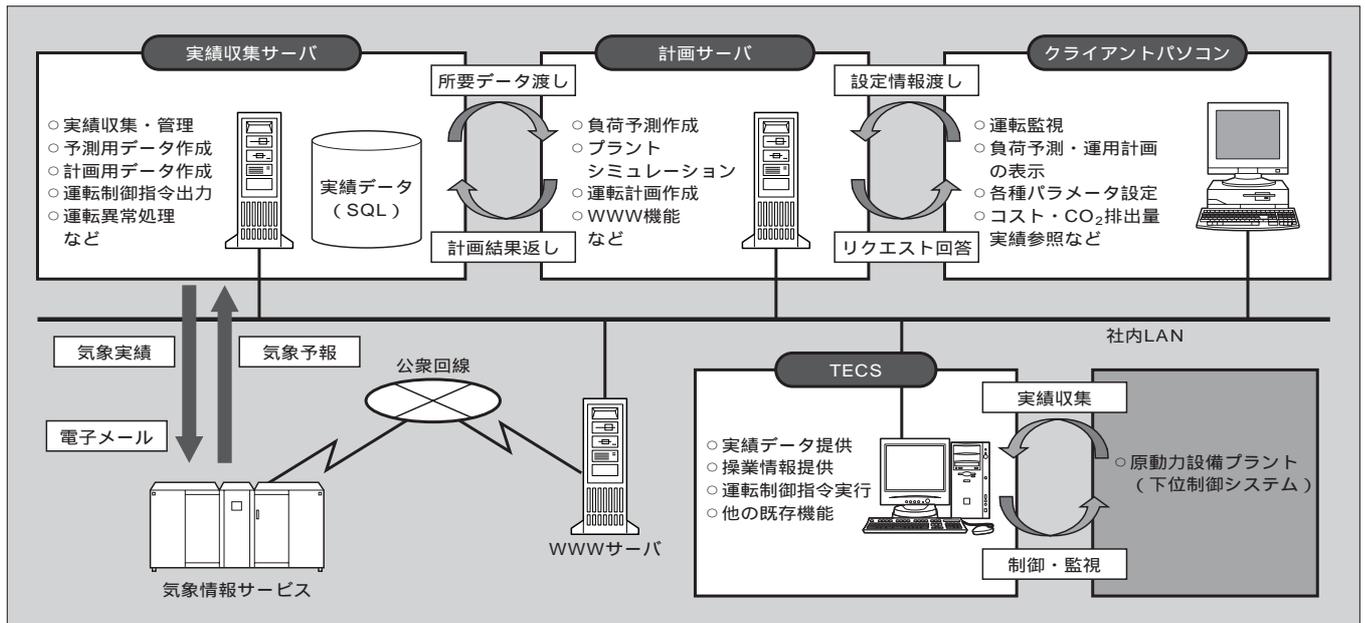
4.3 最適運用制御システムの構成と機能

1) システムの概要

最適運用制御システムの構成を図3に示す。最適運用制御システムは、実績収集サーバ、予測計画サーバおよびクライアントパソコンから構成されている。

実績サーバにおいては、TECS (Toyota Energy Control System) との TCP/IP 通信から、1分周期に実績収集し、運用計画用の30分周期のデータを作成し、計画サーバへセットする。予測計画サーバにおいては、負荷予測および運用計画の立案を行う。立案された設備の運用計画は、実績収集サーバを介してTECSへ転送され、TECSから下位制御システムに運転指令値を設定し、設備の自動運転を行う。クライアントパソコンにおいては、システムの運転監視、負荷予測・運用計画の表示および各種パラメータの設定などを行う。画面系は Web + Java から構築

図3 最適運用制御システムの構成



普通論文

されている。主な画面機能は次のとおりである。

- システム監視画面
- 操業計画設定画面
- 設備運用優先順位設定画面
- 計画・実績表示画面
- 計画表示修正画面
- パラメータ設定画面
- 運用コスト・CO₂ 排出量実績表示画面

2. 負荷予測機能

本システムでは、電気・熱（空調）・蒸気の負荷に対して、30分周期で48時間先まで予測を行っている。電気・蒸気負荷予測はパターン予測をベースに、温度・直近実績などを利用した補正を加えて行われている。電気負荷予測では30分平均値の予測以外に、電気負荷の急変に対応できるように30分最小値の予測も行っている。熱負荷予測は構造化ニューロによって行われている。予測で利用する気象予報情報は気象情報配信会社から、3時間ごとに電子メールで提供され、局所地域（豊田市）の気象予報と工場付近の気象実績に基づいて計算されている。

3. プラントモデル機能

図2の対象プラントに対して、基本的には、統計手法を利用した機器特性と運用ルールなどを統合してプラントモデルを作成している。ガスタービン、排ガスボイラ、蒸気タービンなどの重要設備の運転状態により分類される8パターンのシミュレーションができるように構築されている。

4. 最適運用計画機能

本プラントの最適運用においては、離散変数と連続変数を両方含む非線形混合整数最適化問題となり、最適運用計画は前述のPSO手法によって実現している。

計画周期は30分で計画期間は38時間（76点）である。

同一計画期間において、実績期間の運転状態を固定値として計画周期ごとに補正計画を行い、常に最新の運転状況を反映した運用計画を得るような仕組みとしている。最適化問題定式化の概要は次のとおりである。

a) 状態変数

- 各計画点における以下の量を状態変数としている。
 - 蒸気吸収式冷凍機（×3台）の起動停止状態（夏期）
 - ガス焼き冷温水機（×2台）の起動停止状態（夏期・冬期）
 - 熱交換器（×2台）の起動停止状態（冬期）
 - 熱交換器（×2台）の蒸気流量（冬期）
 - GTG用蒸気吸収式冷凍機の起動停止状態（夏期）

b) 目的関数

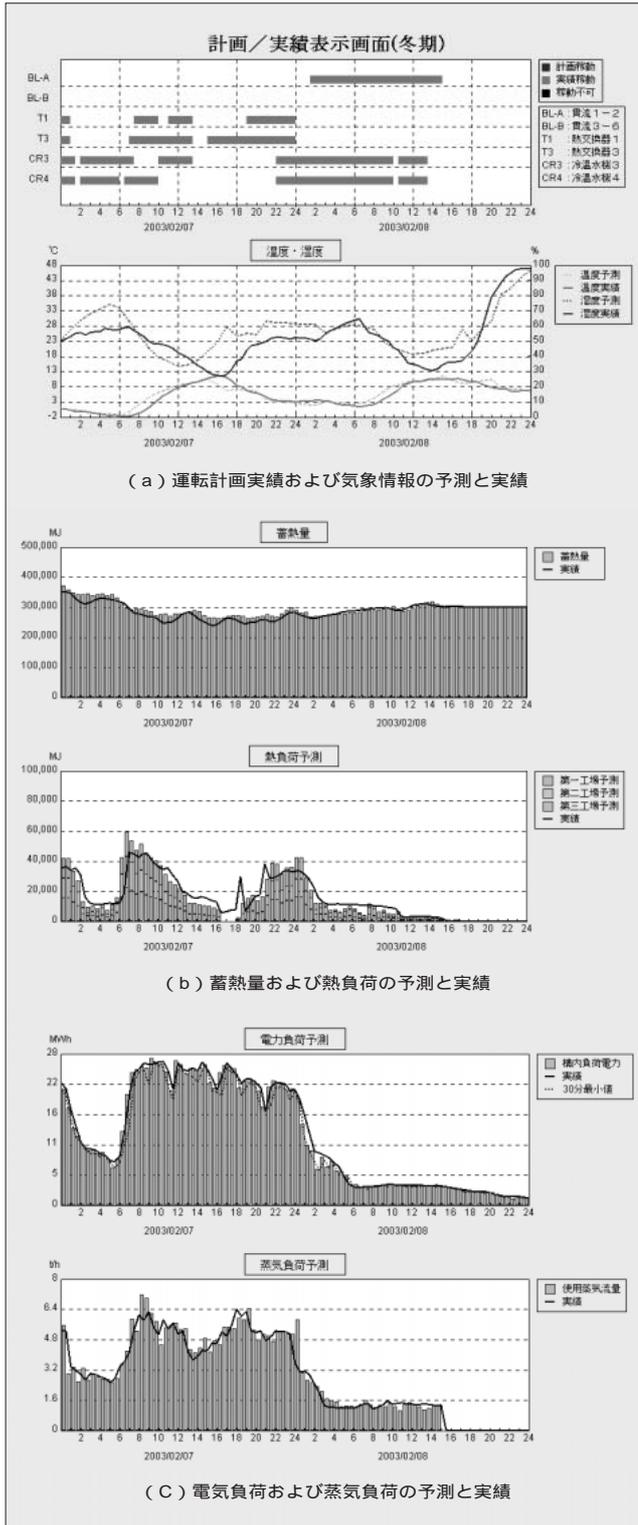
- 運用コストおよび環境負荷の最小を図るために計画期間における下記項目の加重合計値を最小化としている。
 - なお、各項目の重みは自由に調整可能となっている。
 - 全設備のエネルギー費用
 - 全設備のCO₂排出量の最小化
 - 蒸気・熱の需給バランス不均衡量および蓄熱量制約逸脱量を考慮したペナルティ

c) 制約条件

- 設備の特性上の制約や現場の運用ルールを考慮し下記のような制約条件を取り入れている。
 - 熱交換器蒸気流量の上下限
 - 同一機種各熱源設備の起動停止優先順序
 - 蒸気式熱源設備の同時起動制約
 - 熱源設備の最低連続運転時間および最低連続停止時間
 - メンテナンスなどによる設備の起動停止状態固定
 - 休憩時間などによる電気負荷急変時の蒸気式熱源設備の起動制約

注 Java : 米国 Sun Microsystems, Inc. の登録商標

図4 最適運用制御システムの画面例



普通論文

以上のように、最適運用計画機能ではさまざまな制約条件を満足しながら、運用コストとCO₂排出量が最小となるような対象設備の運用計画を立案している。

4.4 負荷予測・運用計画のシステム画面例

図4にある期間の負荷予測・運用計画の画面例を示す。各種負荷予測は、予測誤差が2～4%以内で、高精度の予測結果を得ている。

最適運用計画はさまざまな制約条件に対し、柔軟に対応できているので、説明のできる計画結果が得られている。計画結果はそのまま設備の起動停止の制御指令として出力され、対象設備の完全な自動運転を実現している。

4.5 導入効果

本システムは2002年夏に導入が完了し、現在稼動中である。冬期および夏期の評価期間において、供給品質を維持しつつ、運転員のミニマム化を達成している。また、省エネルギー効果としても、従来の運用に比べて、約10%の低減が得られている。

5 あとがき

本稿では、富士電機の本原動力設備プラントの最適運用制御システムおよび要素技術の概要について説明し、また、トヨタ自動車(株)と共同で取り組んだ適用事例を紹介した。本システムの導入により、運用コスト・CO₂排出量の最小化を実現すると同時に、手動運転の支援や自動運転が可能となる。さらに、最適計画のシミュレータ機能を追加することにより、プラントの最適構成の検証、設備計画、設備投資の策定などにも活用できる。今後もお客様の環境・省エネルギー活動を強力的に支援し、ベストソリューションを提供していく所存である。

参考文献

- 1) 水谷博成ほか．エネルギーソリューション．富士時報．vol.75, no.6, 2002, p.353-357.
- 2) 北川慎治ほか．エネルギープラント最適運用ツール．富士時報．vol.75, no.11, 2002, p.625-629.



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。