

自家発電設備の省エネルギー運用を支える最適化技術

Optimization Technology for Energy-Saving in Private Power Plant Operation

喜多 洋一
KITA Yoichi

飯野 穰
IINO Yutaka

石原 富美子
ISHIHARA Fumiko

地球環境問題への取組みの一環として、産業界も一段と省エネルギー（以下、省エネと略記）に取り組む必要がある。運転員の負担を増やすことなく省エネを行う手段として省エネ制御システムの採用があるが、オンラインで行う速い制御に対応できること、現場で簡単に使えるものであることなど、クリアすべき条件が多く、システム構築にはさまざまなノウハウと技術が必要となる。当社の自家発電設備（BTG：ボイラ、タービン、発電機）の最適運用システムは、これらの課題を解決したオンライン型最適制御システムである。システムは特性係数チューニング機能をもち、区分線形凸計画（PWC-LP：PieceWise Convex Linear Programming）法の採用で短時間に大域最適に近い解が得られる。

It is necessary for industries to make energy-saving efforts in order to protect the global environment. Efficient plant operation is one of the measures that can be taken to save energy. A computerized optimum operating system can save a considerable amount of energy without any increase in operating labor. Optimization techniques applied to industrial plants must respond quickly to changes in process energy demand, and be easy for operators to handle.

Toshiba's new boiler, turbine and generator (BTG)-plant operating system is a highly effective optimization system that meets these requirements. The system features a parameter tuning function to correct the turbine performance characteristics, and a new optimization technique called piecewise convex linear programming (PWC-LP) to rapidly obtain a solution close to the global optimum point.

1 まえがき

かけ声が先行していた環境保全も、COP3京都会議の議定書採択によってCO₂削減が目標から義務へと変わり、実行が求められる段階に入った。2010年という間近な期限までに採用可能な削減手段は限られている。太陽光発電をはじめとする新エネルギーへの期待は大きいですが、さまざまな課題を抱えており貢献度は未知数である。実質的な削減は省エネ対策が中心になるであろう。

民生、運輸分野と異なり、オイルショック時に大幅な省エネを実行した産業分野では省エネ余地が少ない。また、加工・組立産業のように製品コストに占めるエネルギーコストが少なく省エネに対する関心の低い企業が増えたこと、安定成長に移行したため生産増強を目的とした設備投資が行われないことなど省エネへの障害が多い。

このようななか、比較的少ない投資でできる省エネ方策として設備の高効率運用が注目されている。当社は、BTGプラントの最適運用システムを開発し、設備運用の高効率化に貢献している。

産業用設備は、一般的に高価で耐用年数の長いものが多く取替えに多額の費用を要するため、高効率設備への更新といった省エネ対策は現実的ではない。既存設備の効率的な運用が省エネのポイントとなる。そのためには、省エネを意識した生産計画と、まめな運転操作が必要であるが、人手の増加と運用コストの上昇を招く。

最適運用システムは、人手に頼ることなく設備の高効率運用を実現し、大いに省エネに寄与する。

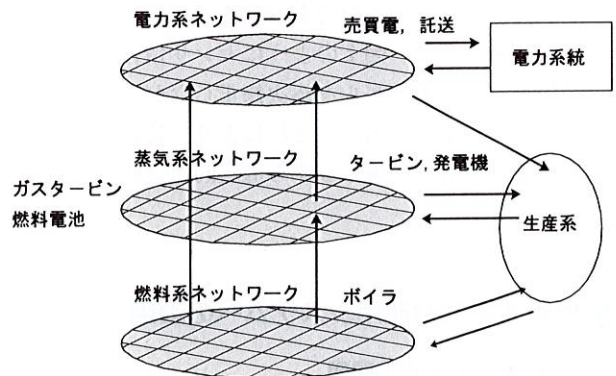


図1. エネルギー最適化問題の概念 電力系、蒸気系、燃料系の多層ネットワーク型最適化問題に帰着する。

Concept of energy optimization problems

2 最適運用システムの役割

2.1 設備の高効率運用

2.2 最適運用システムのありかた

省エネ効果の大きさにもかかわらず、最適運用システムは従来あまり利用されていない。その原因の一つは最適運用システムの複雑さからくる“分かりにくさ”と“手間がかかる”ことであり、もう一つは“省エネ効果が見えない”ことである。普及を図るには、これらの課題を解決したシステムでなければならない⁽¹⁾。

産業用自家発電プラントの最適化を例にとりて、以下にその考え方を紹介する。

2.3 最適運用システムの適用範囲

近年の社会制度の変革に伴って電力が規制緩和され、電力の卸供給や自己託送が可能となり、自家発電プラントの用途が広がった⁽²⁾。これらの新しい動きも考慮すると、産業用自家発電プラントへの最適化適用範囲は、次の3段階が考えられ、レベルが進むほど省エネ効果は大きくなる。

第一段階：エネルギー系だけへの適用 燃料、売買電力の利益・コストを考慮した最適化

第二段階：生産系でのエネルギー使用方法までに適用 安い深夜電力を用いた夜間最大生産など、エネルギーコストを考慮した生産スケジュール最適化

第三段階：工場外まで含めた大域レベルに適用 自己託送や電力小売りを考慮した、自社工場間、異業種企業間の広範囲なエネルギー供給の大域的な最適化

これらは図1に示すような電力、蒸気、燃料、さらにはガス、冷温水などの多層型エネルギーネットワークシステムとしてモデル化でき、そのエネルギーバランス最適化問題として定式化できる。これらの多様なニーズにこたえられるよう、当社では各種の最適化手法を検討してきた^{(3),(4)}。

2.4 実時間最適化

産業プラント制御に最適化手法を適用するうえでの課題は、実プロセスにおいて最適運用をどこまで精度良く追求できるかということである。対象プロセスや環境が頻繁に変化する場合、あるいは他システムとのエネルギー的干渉がある場合には前提条件が崩れ、最適化の意味が失われてしまうので特に注意が必要である。

実時間最適化とは、図2のようにセンサ情報に基づいて効率特性などの対象モデルを逐次修正しながら、最適解を繰り返して解く手法である。これにより、特性変化、環境変化、外乱の影響を考慮しながら適応的に最適性を保つことが可能となる。

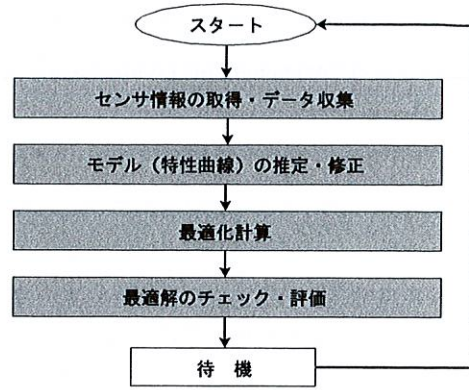


図2. 実時間最適化技術 センサ情報のフィードバックにより、対象・環境変化に適応した最適解を実時間で求める。

Real-time optimization technology

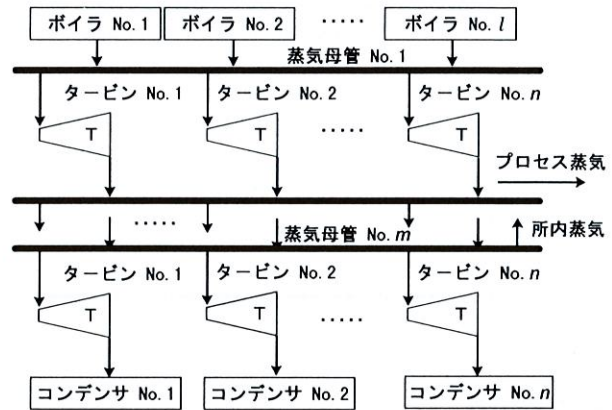


図3. BTGプラントの一般的表現 BTG系は蒸気ネットワーク系としてとらえることができる。

Generalized configuration of boiler, turbine and generator plant

BTGプラントを最適に運用するという問題は、次のような等式・不等式制約条件の下でトータルエネルギーコストを最小にするために蒸気・電気出力をどのように配分するかという問題として記述できる。

(1) 目的関数

$$\Sigma(\text{燃料コスト}) + \text{買電コスト} - \text{売電利益} \rightarrow \text{最小化}$$

(2) 等式制約条件

(a) 電力バランス

$$\Sigma(\text{タービンの発電量}) + \text{買電量} = \text{電力需要量}$$

(b) 各蒸気母管のマスバランス

$$\Sigma(\text{上流からの流入蒸気量}) - \Sigma(\text{下流への流出蒸気量}) - \text{プロセス蒸気量} - \text{所内蒸気量} = 0$$

(3) 不等式制約条件

各ボイラの燃料消費量、蒸気発生量、各タービンの主蒸気量、抽気量、通過蒸気量、各発電機の発電量、大気放出弁蒸気量、母管間減圧弁の通過蒸気量、買(売)電量などの上下限制約がある。

3 自家発電最適運用システムへの適用

3.1 自家発電最適化問題

産業用自家発電設備に多く見られるBTGプラントは、一般に図3のような蒸気ネットワークとしてとらえることができる。

3.2 最適化計算手法

BTG プラント最適化における最大の問題点は、ボイラ、タービンのもつ非線形な効率特性の取扱いである。特に、タービンは図4のような弁点特性と呼ばれる非線形特性をもつため、微分不能点かつ多峰性をもつ非線形目的関数に対する最適化問題になり、一般的な非線形計画 (NLP) 法⁽⁵⁾では最適解の大域性の保証、計算時間などが問題となる。

非線形関数の最適化問題の場合、計算精度と計算時間はトレードオフの関係にあり、時間内に解が得られないことがある。オンライン制御を前提とした実時間最適化の場合、確実に解を得る必要があるため次のように考えた。

- (1) あるレベルの精度で高速に近似解を求める。
- (2) さらに、計算時間の許容範囲内で可能な限り最適化解の精度を向上させる。
- (3) 時間制限で計算を打ち切った準最適化解に対し、大域最適解からのずれを評価する。

このような考えに基づき、PWC-LP 法と NLP 法を組み合わせる手法を採用した。図4に示すようなタービンの非線形特性を、上に凸な区分線形関数で効率上限を覆うように近似する。この結果、次の効果が得られる。

- (1) 線形計画 (LP) 問題に帰着するので、第一次の近似解は少ない計算量できわめて短時間で得られ、また大域性も保証される。
- (2) LP 解は必ず端点である効率極大点として得られるので、比較的良好な性質をもった近似解になっている。
- (3) 近似解を初期値にし探索領域を近似解近傍に限定した NLP 法で、大域的最適解が高い確率で短時間で得られる。
- (4) 区分線形化出力特性関数は、元の非線形出力特性関数より値が大きい。つまり、LP 最適解は厳密最適解の上限值となる。非線形最適化の収束計算過程で両者の比較により、解の収束判定ができる。
- (5) 図4のような従来の NLP 手法が苦手とした微分不可能な点を含む関数にも適用可能である。

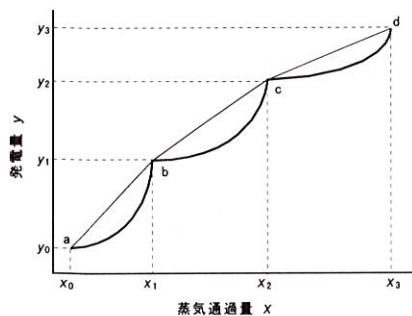


図4. タービン効率の非線形特性 タービンは弁点特性と呼ばれる非線形特性をもつ。

Nonlinearity of turbine efficiency characteristics

4 適用例

使いやすさを追求した新しい BTG 最適運用システムを王子製紙(株)呉工場に納入した。この例を用いて最適化システムのしくみを説明する。

4.1 最適運用システム

4.1.1 蒸気系統図作成 プラントの蒸気系統図は、ユーザー向けのグラフィカルユーザインタフェース (GUI) ツールで容易に作成することができる (図5)。個々のパーツ (ボイラ、タービン、蒸気母管など) を登録しておき、それらのパーツを画面上に自由に配置・結線して、系統図を作成する。また、最適計算に必要な個々のパーツのパラメータ (タービンの蒸気流量の上下限值、発電特性関数の係数など) も、画面からパーツを指定して入力できる。

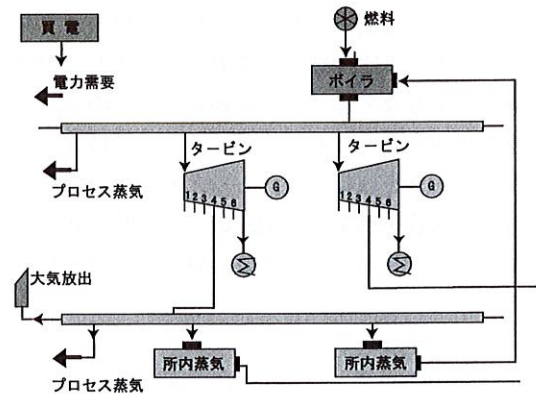


図5. 蒸気系統図作成例 ユーザー向けの GUI ツールで、プラントモデルを容易に作成できる。

Example of steam flow diagram creation

4.1.2 モデルの生成 蒸気系統図を作成すると、各パーツの情報 (パラメータ) やパーツ間の接続関係を解析して、プラントモデルを自動生成する。

モデルは、目的関数、等式制約、不等式制約から成る。目的関数はボイラの燃料単価と買電単価を運転コストと考えて作成している。また、等式制約には、各蒸気母管の蒸気バランス (入力蒸気量 = 出力蒸気量)、電力バランス (発電量合計 + 購入電力量 = 電力需要量) がある。不等式制約には、ボイラの発生蒸気量、タービンの主蒸気流量、通過蒸気量、抽気流量、発電機の発電量のおおのの上下限值がある。

4.1.3 最適計算を解く 生成したモデルを使って最適計算を解く。目的関数を運転コストとして、等式制約・不等式制約を満たす範囲内でコスト最小となる蒸気負荷配分を求める。

前述の PWC-LP 法に従って、まず非線形特性関数を区分

線形に近似した近似式を生成し、LP問題を解いて初期解を求める。さらに、初期解の存在した範囲に限定してNLP問題を解く。

このシステムでは、オンライン制御用とシミュレーション用に分けてプラントモデルをもっている。オンライン制御では、プラントの追従性を考慮し、一度で行う制御量を安定運転を継続できる範囲に制限している。制御幅は%単位でユーザー設定できる(現在は±10%)。

4.2 発電特性式のチューニング

タービン発電機の発電量モデル式は発電量をタービンの抽気段ごとの通過蒸気量による発電量の和で表わし、個々の発電量は n 次多項式の関数を組み合わせた非線形の発電特性関数で表わしている。特性式係数のデフォルト値にはタービン設計値を用いたが、計算値と実測値に差異があり、発電特性関数の係数チューニング機能を用いて係数の修正を行った。

モデル式の精度を高めるための係数の算出では、発電機効率や機械損失、真空度補正を考慮した。また、現実の運転では温度や圧力などはつねに変動しているので、見かけ上の係数も時間とともに変化する。そこで、最近の約2か月間の実測データを収集して、もっとも誤差が少なくなるように特性式係数を推定した(図6)。この特性式チューニングにより誤差のきわめて少ない計算結果が得られるようになった。

4.3 PWCのチューニング

BTG最適運用システムは、5分に1回の最適化計算を24時間連続で行うオンライン制御システムなので、どのようなプラント運転パターンでも最適解が安定して得られることが要求される。PWC-LP法で用いる何種類かの収束判定値やペナルティパラメータをチューニングすることにより、すべての運転パターンについて解けるようにした。万一解けない運転パターンが発生した場合に備え、検証できるし

くみをシステム内に設けている。最適計算に用いた入力データはすべてファイリングして一定期間保存されているので、シミュレーション機能を使用して再現できる。さらに、解けない原因となった制約条件を判定するガイダンス出力ツールを用意した。

4.4 システム導入のメリット

システム導入によるメリットをシミュレーションレベルで評価した。比較のために、ある期間について、最適計算を行わずに運転したときのデータと、同条件で最適計算シミュレーションを行ったときのデータからコストの差分を算出した。平均して2.7%の効率向上が確認できた。

新最適化手法として用いたPWC-LP法では、計算誤差は非常に少なく、最適解は安定して得られるようになった。また、計算時間は10秒程度で完了している。

5 あとがき

省力化の徹底した産業分野で、省エネを推進していくためには最適化技術は不可欠である。BTGプラントのようなエネルギー供給側をはじめとし、エネルギー需要サイドまで含めて最適化技術を適用し、環境対策へのさらなる貢献を旨とする。

文献

- (1) 喜多洋一, BTG最適運用システム, 計測技術, 24, 4, 1996, p.48-54.
- (2) 喜多洋一, 自家発の用途と課題, 省エネルギー, 49, 10, 1997, p.21-24.
- (3) 飯野 稔, 他, モデル予測制御システム MIPCON, 東芝レビュー, 50, 2, 1995, p.131-134.
- (4) 村井雅彦, 線形計画問題に対するアフィン変換法の一構成法と用役プラント最適化問題への応用, システム制御情報学会論文誌, 10, 2, 1997, p.62-69.
- (5) 今野 浩, 他, 非線形計画法, 日科技連, 1978.
- (6) 池田直樹, 製紙工場に見るスチームタービンによる自家発電導入例, 省エネルギー, 49, 10, 1997, p.44-48.

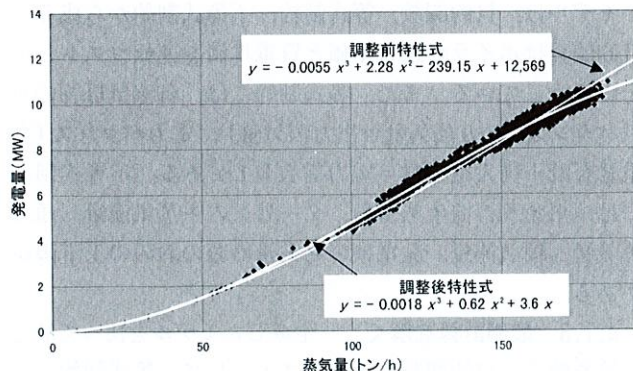


図6. タービン発電特性 運転実績データにより特性式係数を推定。これにより誤差のきわめて少ない計算結果が得られるようになった。

Turbine generating performance curve



喜多 洋一 KITA Yoichi

産業システム事業部 産業プラントシステム技術部主務。
産業プラントシステムのエネルギー管理エンジニアリング業務に従事。電気学会, 日本機械学会会員。
Industrial Systems Div.



飯野 稔 IINO Yutaka

研究開発センター 機械エネルギー研究所主任研究員。
制御技術, 最適化技術の研究に従事。計測自動制御学会, 電気学会, IEEE 会員。
Energy & Mechanical Research Labs.



石原 富美子 ISHIHARA Fumiko

関西システムセンター 情報通信・制御システム技術第一
部。
コンピュータのアプリケーション開発に従事。
Kansai System Center