433 エネルギー供給システムの運用マネジメントのための 最適化手法の総合的活用

Comprehensive Utilization of Optimization Methods for Operational Management of Energy Supply Systems

○正 横山 良平 (阪府大院)

正 伊東 弘一 (阪府大院)

Ryohei Yokoyama, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuen-cho, Sakai, Osaka
Koichi Ito, Osaka Prefecture University

The amount of energy demands tends to increase in the commercial sector, and the energy management has been an important issue to design, operate, and control energy supply systems. In this paper, a framework for the operational management is presented by utilizing optimization and simulation techniques comprehensively. The operational management requires energy demand prediction, optimal operational planning, optimal control, and dynamic analysis. Optimization techniques to identify the values of parameters for prediction and dynamics models as well as to determine the operational and control strategies of energy supply systems are presented. In addition, simulation techniques to analyze the static and dynamic behaviors of energy supply systems are presented.

Key Words: Systems Engineering, Energy Management, Energy Supply Systems, Prediction, Operation, Control, Optimization, Simulation

1. 緒 言

近年、我が国の業務用のエネルギー消費量が増大しており、業務用建物におけるエネルギーマネジメントの重要性が高まっている。特に、最近では、省エネルギー法の改正⁽¹⁾、ESCO事業の出現⁽²⁾⁽³⁾、およびコミッショニングの認知⁽⁴⁾など、業務用建物におけるエネルギーマネジメントに関連して、いくつかの環境の変化が生じており、省エネルギー化を推進するための重要なものとして位置付けられる。しかしながら、業務用建物におけるエネルギーマネジメントについて数多くの課題が指摘されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

このような背景の下に、著者らは、エネルギー供給システムの運用段階におけるエネルギーマネジメントに関して、最適化手法を中心に各種システム工学的手法を開発している。本研究では、それらを総合的に活用するための枠組みについて検討する。

2. 運用マネジメントの枠組み

エネルギー供給システムの運用段階においては、時間的に変動するエネルギー需要量を精確に予測するとともに、機器の運転・停止を合理的に決定しながら、質量流量・圧力・温度などを適切に制御する必要がある。図1は本研究で検討している運用マネジメントの枠組みを示したものである。

まず、環境および建物使用条件によってエネルギー需要量が発生する。ここで、エネルギー需要量を満足するようにシステムが運転されることによって、エネルギー需要量の計測が可能となる。次に、計測された時系列データの解析に基づいてエネルギー需要量の予測を行う。また、エネルギー需要量の予測値に基づいてシステムの最適運用計画を行い、機器の運転・停止および負荷を決定する。一方、機器の負荷を実現するために、状態量としての圧力・温度などの値を最適制御のための制御量の目標値として設定し、質量流量などの操作量の値を決定する。さらに、機器の運転・停止および操作量の値に基づいてシステムが運転され、その結果としてシステムの状態量が変化する。

この一連の運用マネジメントの手順を図2に示す。エネルギー需要量予測および最適運用計画は分～時間オーダーのより長いサンプリング時間間隔で行い、その中で最適制御を秒～分オーダーのより短いサンプリング時間間隔で行う。

図1中のエネルギー需要量予測、最適運用計画、および最適制御の各ブロックについて、最適化手法の開発およびそれに基づくケーススタディを行っている。また、最適運用計画および動特性分析の各ブロックについて、シミュレーション手法の開発およびそれに基づくケーススタディを行っている。以下では、これらのシステム工学的手法について述べる。

3. エネルギー需要量予測

最適運用計画および制御の前提条件としてエネルギー需要量をできるだけ精確に予測する必要がある。本研究では、予測モデルとして、時系列分析モデルの一つである乗法型自己回帰和文移動平均モデル⁽⁷⁾、および階層構造ニューラルネットワークモデル⁽⁸⁾を適用している。

過去の計測値に基づいて予測モデルに含まれるパラメータの値を同定するために、非線形計画法を適用する。しかしながら、計測値は変動を伴っているため、目的関数として通常考慮する計測値と予測値の誤差平方和を最小化する場合に、目的関数が凸関数であることを保証することができず、最適化問題が数多くの局所的最適解を有する可能性がある。そこで、非線形計画法として単純な勾配法によって局所的最適解を求めるのではなく、著者らが提案したモードトリミング法と名付けた大域的最適化手法によって大域的準最適解を求めるようにしている⁽⁹⁾。これによって合理的なパラメータの値が安定的に得られることを確認している。

4. 最適運用計画

運用計画として、エネルギー需要量の予測値に基づいて、システムを構成する各機器の運用方策を決定する必要がある。運用方策としては、機器の運転・停止および負荷を考慮する必要がある。本研究では、機器の運転・停止が決定

Fig. 1 Framework of operational management

されており、負荷のみを決定する場合について検討する。負荷としての熱流量は質量流量および温度によって変化するため、同一の熱流量を供給するにしても、質量流量と温度に代替性が存在する。本研究では、システムのエネルギー消費量あるいはエネルギーコストを最小化するように、質量流量と温度を適切に決定するものとする。

上述の最適化問題の制約条件として、システムの質量、圧力、およびエネルギーバランスを考慮する必要がある。また、これらを満足するような実行可能解を導出するために、静特性シミュレーションを行う必要がある。本研究では、ネットワーク型機械システムの汎用シミュレータを開発し、静特性シミュレーションを柔軟にかつ効率良く行えるようにしている⁽¹⁰⁾。また、最適化問題を非線形計画問題として考慮し、前述のモードトリミング法による大域的最適化手法を適用している。

なお、機器の負荷に加えて運転・停止を同時に決定するためには、モードトリミング法による大域的最適化手法を、非線形計画問題だけではなく混合整数非線形計画問題にも適用できるように、拡張する必要がある。これは今後の課題である。

5. モデル予測制御

最適運用計画によって運用方策の目標が決定されたとしても、それが達成されるようにするためには、システムの状態量の動的な変化に対応して機器を適切に制御する必要がある。本研究では、熱源およびポンプなどの機器を一括して制御することを目的として、モデル予測制御を適用し、温度などの制御量を滑らかに目標値に近づけるように参照軌道を生成しながら、質量流量などの操作量を適切に決定している⁽¹¹⁾。

モデル予測制御のための最適化手法として、通常の二次計画法を適用している。ただし、モデル予測制御のアルゴリズムをコントローラに組み込むために、最適化計算を高速に行う方法について検討している。また、最適化問題における制約条件としてシステムの動特性を考慮する必要がある。ここでは、動特性を表現するためのモデルとしてARXモデルを採用し、このモデルに含まれるパラメータの値を同定するために、前述のモードトリミング法による大域的最適化手法を適用している。

6. 動特性分析

システムの運用段階においては、動特性分析のためにシステムの動特性を計測する必要があるが、システムの設計

Fig. 2 Procedure for operational management

段階や計測値が十分に得られていない場合においては、数値計算に基づく動特性シミュレーションが必要になるものと考えられる⁽¹²⁾⁽¹³⁾。本研究では、前述のネットワーク型機械システムの汎用シミュレータによって、静特性シミュレーションに加えて動特性シミュレーションも柔軟にかつ効率良く行えるようにしている⁽¹⁴⁾。

7. 結 言

エネルギー供給システムの運用段階におけるエネルギーマネジメントに関して、最適化手法を中心に各種システム工学的手法を総合的に活用するための枠組みについて検討した。また、本研究で開発を行っているエネルギー需要予測、最適運用計画、最適制御、および動特性分析のための最適化手法およびシミュレーション手法の概要を示した。今後はこれらの手法を統合化し、一連の運用マネジメントについて具体的に検討する予定である。

なお、本研究の一部は、平成16年度科学研究費補助金(基盤研究(C)、課題番号15560734)の援助によって実施された。

文 献

- (1) 本橋, 空気調和・衛生工学, **77**-8 (2003), 713-718.
- (2) [特集] 動き出したエネルギーサービス事業(ESCO), エネルギー・資源, **20**-6 (1999).
- (3) [特集] ESCO事業の現状と展望, 空気調和・衛生工学, **76**-5 (2002).
- (4) [特集] 日本でコミッショニングが定着するためには何が必要か?, 空気調和・衛生工学, **77**-7 (2003).
- (5) 田中・三船・山本, ビルの実践的省エネルギー/省コスト戦略, (2002), オーム社.
- (6) 高橋・浅野, エネルギー・資源学会第20回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, (2004), 523-526.
- (7) 横山・熊城・伊東・神村・松葉, 機論, **70**-697, C (2004), 2682-2690.
- (8) Yokoyama, R., Inui, M. and Ito, K. *Proc. 18th Int. Conf. on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, (2005), (to be published).
- (9) 横山・伊東, 機論, **69**-688, C (2003), 3243-3250.
- (10) Yokoyama, R., Takeuchi, S. and Ito, K., *Proc. ASME Turbo Expo 2005*, Paper No. GT2005-68392 (2005), 1-7.
- (11) 横山・三村・木下・伊東・神村・松葉, 日本機械学会関西支部第80期定時総会講演会講演論文集, (2005), 3-5-6.
- (12) 木川・上田, 機論, **65**-630, C (1999), 587-594.
- (13) 丹羽, 空気調和・衛生工学, **77**-11 (2003), 1009-1017.
- (14) 木下・横山・伊東・神村・松葉, 日本機械学会関西支部第80期定時総会講演会講演論文集, (2005), 3-3-4.