

エネルギーの需給最適を実現する連携制御と その効果測定

JEITA 制御・エネルギー管理専門委員会 WG1*

* (一社) 電子情報技術産業協会：JEITA 制御・エネルギー管理専門委員会
WG1 東京都千代田区大手町 1-1-3 大手センタービル
* WG1, Control and Energy Management Technical Committee, JEITA,
Ote Center Bldg., 1-1-3, Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo, Japan

キーワード：連携制御 (RENKEI control).
JL 0001/14/5301-0031 ©2014 SICE

1. はじめに

産業界においては、従来からの地球温暖化対策ならびに経済的・効率的なものづくりの観点からの省エネルギー（省エネ）に加え、東日本大震災による電力供給不足・エネルギーコスト増大に対応した節電・ピーク電力カットが強く要請されている。一般社団法人 電子情報技術産業協会 (JEITA) 産業システム事業委員会の制御・エネルギー管理専門委員会では、工場やビルを中心に産業・業務部門のエネルギー需給の管理・制御を最適に行う方式を総称して、「連携制御」と名づけ、その普及に取り組んでいる。普及を図るために、2012年1月に連携制御の導入検討から効果の検証方法までを網羅した「連携制御ガイドブック」を刊行するとともに、JEITAのホームページにて公開している¹⁾。IEC(国際電機標準会議)/TC65/JWG14にも「RENKEI CONTROL」という用語とともに、省エネ全般の大きな課題である導入効果の測定方法を提案している。

連携制御は、需給のミスマッチによる無駄を省くものであり、導入による省エネ効果は非常に高い。工場や事業所のエネルギー供給設備は、一般に最大需要に合わせて計画されている。ところが、需要は変動し、また、近年は国内経済が構造的に低迷しているため、生産設備においては設備容量に対し低レベルの稼働（エネルギー需要）となっている場合が多く、エネルギー供給設備の効率を高く保つことが難しくなっている。一方、エネルギーは輸送や保存が難しいため、エネルギーを無駄にしないためには、需要に合わせた供給（需給連携）を行うことが重要である。

連携制御の適用については、製鉄所や石油化学工場では、エネルギーコストの比率が大きいいため、以前からプラント全体でエネルギー効率を最大化するように各設備が設計され、運用されている。特に、製鉄所などのエネルギーセンターでは、副生成物のエネルギーも含めて供給側と生産側の設備を連携し、最適に制御することが行われている。また、大規模な自動車工場などのユーティリティ設備では、需給を連携したエネルギー最適運用システムを導入し、大きな省エネ効果を上げている。ただし、こうしたシステムの構築には、コンピュータや制御の専門家集団と、高信頼で

高性能な情報制御システムを必要とした。このため、中小規模の工場、事業所では、投資回収が難しく一般に広く普及するにはいたらなかった。しかしながら、エネルギー需給の逼迫とともに、情報制御システムの進歩²⁾、国の施策などにより、中小規模のシステムでもそれに応じたコストで連携制御が実現できるようになってきた。

国のおもな施策は、BEMS アグリゲータ制度³⁾ や横浜市・北九州市などのスマートコミュニティ実証事業⁴⁾ などである。

本解説では、連携制御の概要、適用例、その効果測定方法の課題、ならびに連携制御で利用されるシステム制御技術とエネルギー管理モデルについて紹介する。

2. 連携制御の概要

ビルや工場などでは、電気やガス、燃料などの外部から供給されたエネルギーだけでなく、蒸気や冷温水、圧縮空気などのエネルギーを作り、冷暖房や製造設備の運転に使っている。近年は、性能の優れた個々の設備や装置の導入による省エネ対策が進んでいる。また、「見える化」によりエネルギー使用量の実態把握を行い、省エネ活動を推進することも行われている。しかし、エネルギーは貯蔵が難しく、移動には損失が伴うため、需要と供給のミスマッチによる無駄が発生しやすい。また、ビルや工場などでは、最大需要に合わせて供給設備を設計しているため、需要が少ないときに単純に供給を減らすだけでは、効率が悪化するなど改善の余地が大きい。民間製造業や輸送部門の省エネ対策では、単体として優秀な省エネ性能をもつ設備や装置の導入が進んでいるが、期待した効果が出ない場合も散見される。これは、工場や事業所が複数の設備や装置を組み合わせで運用されるため、それぞれが部分負荷で運転され、最高のエネルギー効率が得られないことに起因する。このように、定格負荷条件などを元にした設備単位での部分最適化では、多くの無駄が発生しがちである。工場や事業所のエネルギー効率を高めるためには、エネルギー供給源を担う動力・熱源設備などの供給側を、ダイナミックに変動する需要にあわせて最適に運用すること、すなわち全体最適化のアプローチが必要になる。

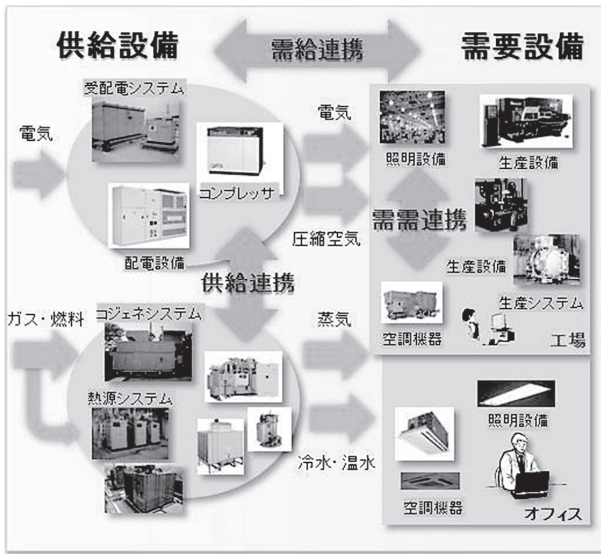


図1 連携制御の概念

連携制御とは、図1に示すように需要と供給のミスマッチによる無駄や、複数の供給設備間で生じる無駄を削減するため、需要側、供給側の設備同士を互いに連携させ、全体を最適に制御するコンセプトであり、各種エネルギーのセンシング、モデリング、予測、最適化、多変数最適制御などの計測制御技術を駆使したソリューションである。また、供給設備、需要設備を段階的に連携させることにより、一步一步省エネを進めることが可能であり、現場サイドにとって導入しやすい形態をとることができる。したがって、連携制御にはさまざまな形態があり、ここでは5種類のカテゴリを紹介する。

(1) 供給機器連携

供給設備内での各機器の個々の特性を考慮した運転を制御する手法である。機器の組合せや設定を最適配分してコストあるいはCO₂排出量を最小化する。たとえば、電気を使う熱源と燃料・ガスを使う熱源の負荷の最適配分や、ボイラ、ポンプ、コンプレッサーなどの複数の機器の最適運転制御など、機器個々の特性(例：大型/小型、旧式/最新などの組合せ)を考慮した負荷の最適配分を行う。時間軸を考慮すると、大規模な最適化問題となり、種々の最適化手法が適用されている。

(2) 供給設備連携

複数の供給設備間の連携運転を制御する手法である。たとえば、工場内の複数の供給設備を一つの供給設備とみなした負荷の最適配分や、隣接工場の供給設備を一つの供給設備とみなした負荷の最適配分など、供給設備間の負荷を最適に配分するものである。

(3) 需給連携

需要設備の需要量に応じて供給設備の運転を制御す

る手法である。現在の需要量あるいは需要量の予測値に基づいた供給機器の負荷の最適配分を行うものである。たとえば、小規模では設備冷却水の設備側運転状態に応じた流量の制御などが、大規模では工場のエネルギーセンターや地域冷暖房プラントにおける気象情報などを用いた需要予測による熱源と蓄熱槽の最適運転制御などが該当する。

(4) 需給双方向連携

需要設備の需要量に応じて供給設備の運転を制御し、さらに供給設備の能力を超える需要がある場合、需要側の調整を行う手法である。需要側の調整としては、操業調整を行う場合や生産計画の変更を行う場合がある。電力デマンドの制約量に合わせた操業調整などが、電力を大量に消費するプラントで行われてきたが、今後さらに双方の連携がすすみ、生産スケジュールの組み換えなどへ適用範囲が広がると考えられる。また、デマンドレスポンスのように、エネルギーコストをダイナミックに変化させ、需要量と供給量を同時に制御するという新たなアプローチも試みられている。

(5) 需要設備連携

需要設備の生産システム同士が連携し、需要側の調整を行う手法である。この場合も需要側の調整としては、操業調整を行う場合や生産計画の変更を行う場合がある。すでに節電対策として、電力デマンドの制約量に合わせた操業調整などが、電力を大量に消費するプラントで行われている。現状は生産ラインの同時停止がほとんどだが、今後、生産スケジュールをもとに、生産システムの順次停止起動など、制御方式の高度化が進むと予想される。

3. 連携制御の事例

連携制御の導入事例としてはさまざまな事例^{5)~12)}が報告されている。本章では、供給設備連携の例として、国内でいくつかの実績のある自動車工場の原動力プラントの最適運用の典型的な事例^{5),6)}を紹介する。対象の原動力設備プラントの構成を図2に示す。おもな機能とその効果を以下に示す。

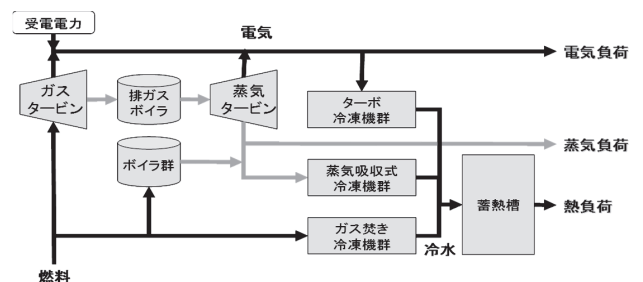


図2 原動力設備プラントの構成

(1) 負荷予測機能

電気・熱(空調)負荷・蒸気負荷に対し、30分単位で48時間先まで予測を行う。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う。熱負荷予測は、構造化ニューラルネットワーク⁷⁾やカルマンフィルタ⁶⁾などを使用したものが適用されている。予測には、気象情報配信会社から3時間ごとに電子メールによって提供される気象予報情報を取り入れている。

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。

(2) プラントモデル機能

図2の対象プラントに対して、実績データを統計処理して得られた機器特性や運用ルールなどを統合し、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いくつかのパターンが、シミュレーションできるように構築されている。

(3) 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含む非線形混合整数最適化問題となり、最適運用計画は各種最適化手法によって算出している。計画周期は30分で、計画期間は24~38時間である。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。

設備の特性上の制約や現場の運用ルールを考慮したさまざまな制約条件を満足しながら、運用コストあるいはCO₂排出量が最小となるような運用計画を立案する。計画結果は、ガイダンスシステムとして運転員にガイダンスを出す場合と直接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する場合がある。

本システムにより、供給品質を維持しつつ運転員負荷のミニマム化を達成し、従来の運用に比べ省エネ効果として約3~10%の低減が得られる。

4. 効果測定

連携制御を導入した場合、それがどの程度の効果があったかを検証する必要がある。その検証のためには、適切なバウンダリ・期間を決めて導入前後でのエネルギー効果指標(Key Performance Indicator: KPI)を比較するのが一般的である。以下に、その手法について述べる。

(1) エネルギー効率指標(KPI)の選定

KPIには、影響因子の変動に強いこと、継続性があることが求められる。一方で、KPIの精度や厳密さを求めるには、検証のためのコストがそれらに応じてかかることに留意する必要がある。KPIとしては、エネ

ルギー総消費量やエネルギー総コストの値を導入前後で単純に比較する方法があるが、工場や商業ビルなどでは、生産数量、売上高、入場者数などが導入前後で必ずしも同一でなく、エネルギー総消費などの値はそれら因子に影響を受け、導入前後でのその単純な比較では導入効果検証に適切でない場合が多い。そこで、つぎのKPIのいずれかを一般に適用する。

① エネルギー消費原単位、エネルギーコスト原単位

エネルギー総消費量あるいはエネルギーコストを、エネルギーの使用量と密接な関係をもつ値で除した値である「原単位」をKPIとする。原単位を比較することにより、導入前後での生産数量などの影響因子の変化の影響を除くことができる。ただし原単位方式では、分母に選定した影響因子以外の変動は考慮されないし、影響因子に依存しないエネルギー消費量のバイアス部分がある場合は、導入効果が過小に評価される場合があるなどの欠点がある。

② エネルギーベースラインモデル

上記①の「原単位」の欠点を補う方法として、導入前のエネルギー消費量と影響因子の関係をモデル化し、これをエネルギーベースラインとする方法を考える。導入後の影響因子の値をこのモデルにあてはめて、エネルギー消費量を算出し、同じ影響因子の値での導入前エネルギー消費量を推定する。これと実際のエネルギー消費量と比較することにより、導入効果を算出する。モデルは、重回帰式などさまざまな統計モデルを適用できるが、あまり複雑なモデルだと扱いにくいので、できるだけシンプルなモデルとすることが肝要である。具体的には、重要な要因をいくつかに絞って、それらの一次式で表現した重回帰式を推奨する。

一例として、エネルギー消費量を生産数量の一次式で表わす例を図3に示す。導入後の検証により、生産数量 x_1 でエネルギー消費量 y_1 であったとする。導入前のエネルギーベースラインが図の直線で表わされ、生産数量 x_1 に対応するエネルギー消費量は y_0 と推定し、 y_0 と y_1 との差異が導入効果となる。

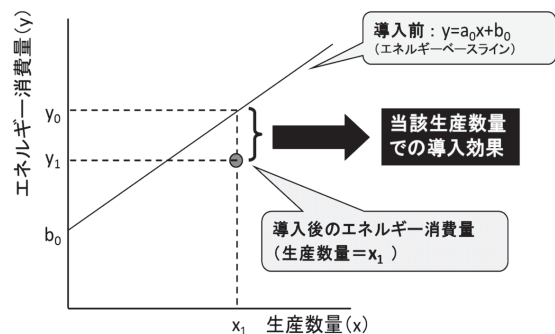


図3 導入前のエネルギーベースラインとの比較の例

(2) バウンダリの設定

導入効果検証には、エネルギー消費量を計測し、KPIを算出するバウンダリ（機器/設備/施設）を適切に設定する必要がある。次章で取り上げる「エネルギー管理モデル」の考えにしたがい、バウンダリを決めることが望まれる。連携制御の効果検証のためには、連携制御が影響をおよぼすバウンダリを含むようにするが、影響しない部分はできるだけ除外するようにすると導入効果がより明確になる。

(3) 期間の設定

導入前後の効果検証のためには、連携制御を導入する設備のエネルギー消費に影響を与えるさまざまな外的要因（気象条件、設備稼働・運転パターン、製造品目など）の影響を、できるだけ排除できるような期間をとることが望ましい。そのためには、一般的に少なくとも1年間にわたる期間での検証が望ましい。しかし、検証のためのデータ収集や分析にはコストがかかるので、効果の大きさや必要度に応じて、以下に例示するような期間から合理的に選択する。

- ① 典型的なパターンの1日間
- ② 連続する1週間
- ③ 季節ごと代表日
- ④ 1年間
- ⑤ 数年間（必ずしも連続である必要はなく、上記①～④を数年間にわたり追跡）

導入時点から短期間での運用による効果検証が必要となる場合には、①や②のデータを元に算出したKPIを求め、1年間に渡る影響因子を考慮した補正を行い、期間による加重平均などを行うことで、1年間に対するみなし効果として評価することもある。

(4) データ収集

連携制御の対象とする設備について、電気、燃料、熱源などの投入（消費）エネルギーを、可能な限り設備単位に分離して計測する。気象データや製造品目、生産量などの影響因子のデータも同時に収集する。

連携制御の導入効果算出のためには、導入以前のデータについても、あらかじめ取得しておく必要がある。

また、収集データについて、収集方法や使用した計器の精度を明らかにする必要がある。導入効果を精度良く検証するためには、計器のキャリブレーションを行うことが望ましい。

(5) 検証結果の表現方法

最終的な結果は、設定したバウンダリ・期間における導入前後のKPIとその差分（比率）である導入効果を数値で示す。図4は、導入前後のエネルギー消費原単位と削減率を日ごとにグラフで表示した例である。

また、エネルギーベースラインとの比較では影響因子を横軸に、エネルギー使用量（費用）を縦軸にして

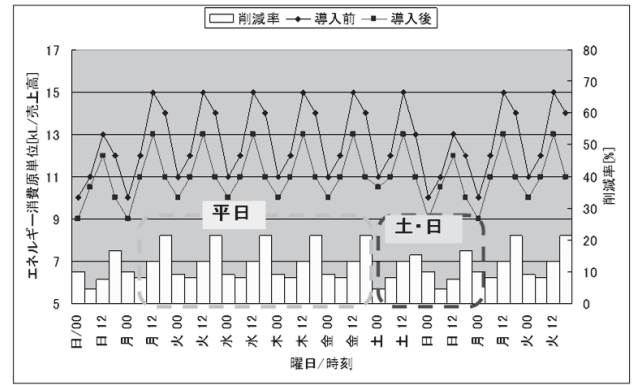


図4 検証結果の表現例（導入前後のKPIの時間変動）

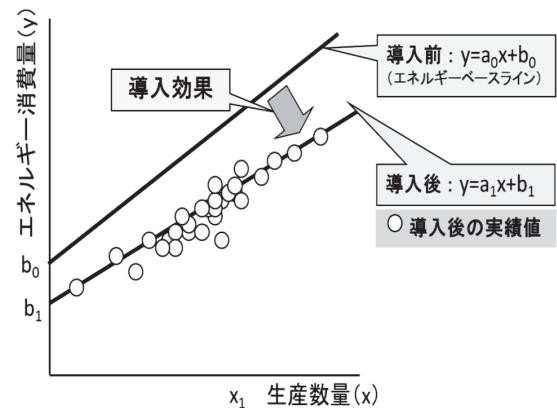


図5 検証結果の表現例（導入前のエネルギーベースラインとの比較）

ベースラインを図示し、導入後の実績値をそれにプロットすることにより、導入効果が視覚的に明確になる。図5は、その一例である。

5. エネルギー管理モデル

連携制御を適用するには、対象をモデル化する必要がある。統一的なエネルギー管理と評価方法の概念は、図6のように、エネルギー管理の単位となるモデルと、関係するステータスを組み合わせることで定義する。このエネルギー管理モデルの目的は、バウンダリで区切られた範囲の設備や機器のエネルギー使用量と、エネルギー使用量に密接に関連する変数の関係を示し、このモデルが適切なエネルギー効率で動作しているかを調べることである。さらに、モデルの稼働



図6 エネルギー管理ユニット：EMU

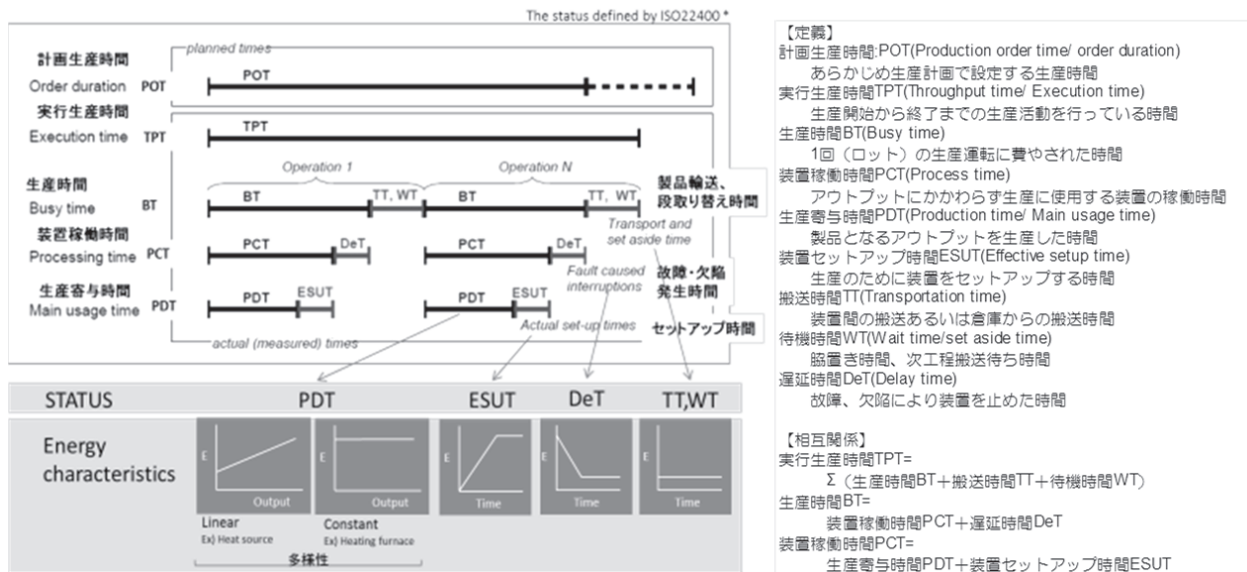


図7 EMUにおけるステータスとエネルギー特性

働に伴うエネルギーの消費をできるだけ正確に予測し、省エネ対策導入後の効果を算定するためにも用いられる。このモデルをエネルギー管理ユニット(EMU: Energy Managed Unit)と呼ぶ。

エネルギー管理モデルは、入力と出力より定義され、その差分はロスとして扱われる。入力の基本は、モデルのバウンダリに投入されるエネルギーや原料である。原料とは、製品を製造するための原料、前工程の出力(部品や中間製品など)などを定義する。出力は、このモデルのアウトプットであり、最終製品、中間製品(半製品)や、蒸気/冷温水などのユーティリティ出力が相当する。

入力として扱う運転条件は、省エネ対策の導入前と導入後を、できるだけ同一条件で比較評価できるようにするために、モデルに大きく影響を与える要因を定義する。たとえば、季節・気象条件、対象モデルの動作設定としての生産条件やロット名、主要装置・設備の運転/停止などがあげられる。

5.1 エネルギー管理モデルでのステータス

生産工場の場合では、1日の生産時間内であっても生産の準備段階、故障発生、レシピ変更など安定生産以外にいろいろな操業ステータスがあり、そのステータスでのエネルギー消費パターンは大きく異なることが多い。しかも、それぞれの操業ステータスが1日の生産時間に占める割合はまちまちであり、厳密に言えば日々の操業パターンは異なる。

商業ビルの場合でも、従業員勤務時間、テナント営業時間、昼食時間、閉館時間などのステータスでエネルギー消費量は、大きく異なる。外気温、曜日、営業条件などの運転条件が同じでも、各ステータスの占める割合でエネルギー消費量、エネルギー原単位などのエネルギー効率指標は大

きく異なる。

エネルギー管理モデルでのステータスの概念は、国際規格¹³⁾で定義されており、生産に関わる設備などの各種の状態(Time model)をステータスと表現している。

図7を使って、ロット単位の組み立てを行っている一般的な工場を例に、EMUにおけるステータスの代表例と、それに対応する消費エネルギーパターンの変化を説明する。

生産寄与時間:PDT中は、生産量に応じてエネルギー消費量が比例的に増加する場合(熱源装置など)や一定の場合(加熱炉など)があり、EMUの特性に応じてケースバイケースである。装置セットアップ時間:ESUTは、設備(群)を完全停止状態から立ち上げているステータスであり、時間の経過とともにエネルギー使用量が増加する例を示している。遅延時間:DeTは、故障、欠陥により装置を止めたステータスであり、時間の経過とともにエネルギー使用量が減少し、最終的に待機状態のエネルギー使用量になっている。搬送時間:TT、待機時間:WTは、別のロットに生産変更するための準備作業のステータスであり、待機状態のエネルギー使用量が継続する場合を示している。

このように、ステータスの違いによって消費エネルギーのパターンは、生産量に関連したり経過時間に関連したりと大きく変化する。

実際にステータス管理を使用する場合は、各ステータスは図7のように一義的ではなく、それぞれ連携制御対象範囲として設定されたバウンダリに最適なものを独自に定義して使用すると効果的である。簡便で有益な手法としては、設備(群)の生産寄与時間:PDTとそれ以外に大きく2分するだけでも、ベースラインモデルの精度向上に効果がある。

6. 展望と課題

今後、ますます連携制御の導入が活発化するとともに、機能と適用範囲の拡大が予想される。

機能拡大では、めまぐるしい市場変化に対応するために、製造スケジュール管理機能や受発注システムで行われる需要予測機能と連動する必要がある。また、最適生産量に適合したエネルギーを予測・制御する連携機能や電力需給の逼迫により、電力負荷の平準化を目的とした高度なデマンド制御との連携が考えられる。

個々の製造現場・事業所の範囲にとどまらず、コンビナートで行われているような、地域に存在する事業所の設備間での連携を行い、地域内でのエネルギー最適化を目指す地域冷暖房システムの発展型のような連携制御に進化していくことが予想される。

さらに電力デマンド制御では、個々の事業所内でのデマンド管理から地域全体でのデマンド管理を行うスマートグリッドへの対応が必要とされる。

以上のような連携制御の拡大を着実にかつ迅速に実現するための課題は、導入コスト削減と通信仕様・運用方法などを含む ICT の標準化である。

コスト削減では、パッケージ化を進めてエンジニアリングコストを極力抑えるのに加え、省エネ効果を調査するフィージビリティ・スタディ (FS) 段階のコスト、また対策導入後の機能維持・向上コストの削減が重要である。対策投資に見合う効果が得られるかを判断するための FS 段階の費用負担は、ユーザにとって連携制御導入に対する大きな障害になっている。また効果ある対策をしても市場の状況に影響され生産品種、生産方法など刻々と変化していく。その変化に合った最適な連携制御機能を維持するための維持・向上費用は必要不可欠であり、その削減が望まれる。

これらの努力も必要であるが、実際に現場で使用されている測定器、制御機器、電動機を含む操作端、操業管理システムは、各社の多種多様な機器を効率よく統合するための ICT の標準化も望まれる。

さらに、国による連携制御の普及施策・支援が大いに期待される。

(2013年9月26日受付)

参考文献

- 1) JEITA 制御・エネルギー管理専門委員会 WG1: 連携制御ガイドブック
- 2) JEITA 制御システム専門委員会: ICT の進展で変わるエネルギー管理・制御システム, 省エネルギー, **64**-10, 22/27 (2012)
- 3) <http://sii.or.jp/bems/aggregator.html>
- 4) http://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/smart_community/community.html
- 5) 項, 川森, 福山: 原動力設備プラントの最適運用と適用事例, 富士時報, **77**-2, 166/170 (2004)
- 6) 植木, 鈴木, 今福: 原動力設備の運用最適化パッケージの開発, アズビル技報, 2009年12月号

- 7) 福山, 戸高: ユーティリティ設備の最適運転による省エネルギー, 計測と制御, **45**-10, 871/874 (2006)
- 8) 植木, 鈴木, 今福: ユーティリティ設備の運用最適化事例, 計測と制御, **51**-1, 83/86 (2012)
- 9) 高津: 高度制御・最適化ソリューション, 横河技報, **50**-3, 87/90 (2006)
- 10) 若杉, 末吉: 高度制御技術による省エネルギーソリューション, 横河技報, **53**-1, 11/14 (2010)
- 11) 戸坂, 角田, 鈴木, 近藤: 工場における省エネ支援事例, 月刊省エネルギー, **64**-8, 48/51 (2012)
- 12) 月刊省エネルギー, 2012年10月号
- 13) ISO/WD 22400-2

[著者紹介]

井 上 賢 一 君

横河電機 (株) IA マーケティング本部グリーンファクトリー推進室 エネルギー効率標準化推進課 課長。

植 木 和 夫 君

アズビル (株) アドバンスオートメーションカンパニー アドバンス・ソリューション部 シニアコンサルタント。

大 内 俊 之 君

横河電機 (株) IA マーケティング本部グリーンファクトリー推進室 エネルギー効率標準化推進課。

黒 谷 憲 一 君 (正会員, フェロー)

富士電機 (株) 技術開発本部 技師長。

鈴 木 健 司 君 (正会員)

三菱電機 (株) 計測制御製造部 エコファクトリー技術グループ。

鈴 木 康 央 君

アズビル (株) アドバンスオートメーションカンパニー アドバンス・ソリューション部。

藤 田 賢 一 君

(株) 荏原電産 開発統括室 監視制御開発部 副参事。

松 井 哲 郎 君

富士電機 (株) 技術開発本部 製品技術研究所 制御技術開発センター 需要家ソリューション開発部 マネージャ。

松 本 宏 治 君 (正会員)

富士電機 (株) 産業インフラ事業本部 システム技術部 課長。

若 狭 裕 君 (正会員)

(一社) 日本電気計測器工業会/横河電機 (株)。