

社会インフラの最適化を支える エネルギーシミュレーション技術

Energy Simulation Technologies for Optimization of Social Infrastructure

富田 泰志

Tomita Yasushi

河村 勉

Kawamura Tsutomu

犬塚 達基

Inuzuka Tatsuki

中野 道樹

Nakano Michiki

エネルギーインフラの低炭素化，経済性，安定供給へのニーズが顕在化している。これに対して，需要家のユーティリティシステムから地域の熱供給システムや広域の電力系統を協調させることによる，全体最適なエネルギーインフラの実現が期待されている。日立グループは，地域および工場やビルの省エネルギー，電力系統制御における各種のエネルギー解析制御技術を融合し，ライフサイクルを通してマルチユーティリティ，全体最適なエネルギーインフラの実現に取り組んでいる。

1. はじめに

エネルギーインフラにおいて，再生可能エネルギー導入やEV (Electric Vehicle) などの利用の拡大による低炭素化へのニーズ，燃料価格上昇や低炭素化対策費増加における経済性へのニーズ，大停電や震災を受けた安定供給へのニーズがグローバルに顕在化している。

エネルギーインフラは，広域の大規模集中電源から需要家に電力を供給する電力系統と，地域で集中熱源から需要家に冷水や温水を供給する地域熱供給システム，さらに，需要家内で一次エネルギーから冷温水や蒸気などのユーティリティを生成するユーティリティシステムなどが接続されて構成される。近年では，それらを協調させた全体最適なエネルギーインフラの実現を模索する取り組みも盛んである。

日立グループは，これまでに培ってきた，地域および工場やビルの省エネルギーや，電力系統制御における各種のエネルギー解析制御技術をエンハンスして融合し，ライフサイクルを通してマルチユーティリティ，全体最適なエネルギーインフラの実現に取り組んでいる（図1参照）。

このトータルなソリューションの開発において不可欠なシミュレーション技術として，電力系統を中心に需要家との相互作用を柔軟に解析できるスマートグリッドシミュ

レータ，地域の熱と電気のマルチユーティリティネットワーク最適制御のための地域エネルギーシステムシミュレータ，需要家のマルチユーティリティ系の省エネルギー設計向けのユーティリティシステム省エネルギー解析シミュレータがある。

ここでは，需要家から地域や電力系統までのエネルギーインフラの設計，制御，診断，保守，改修のライフサイクルを支えるシミュレーション技術について述べる。

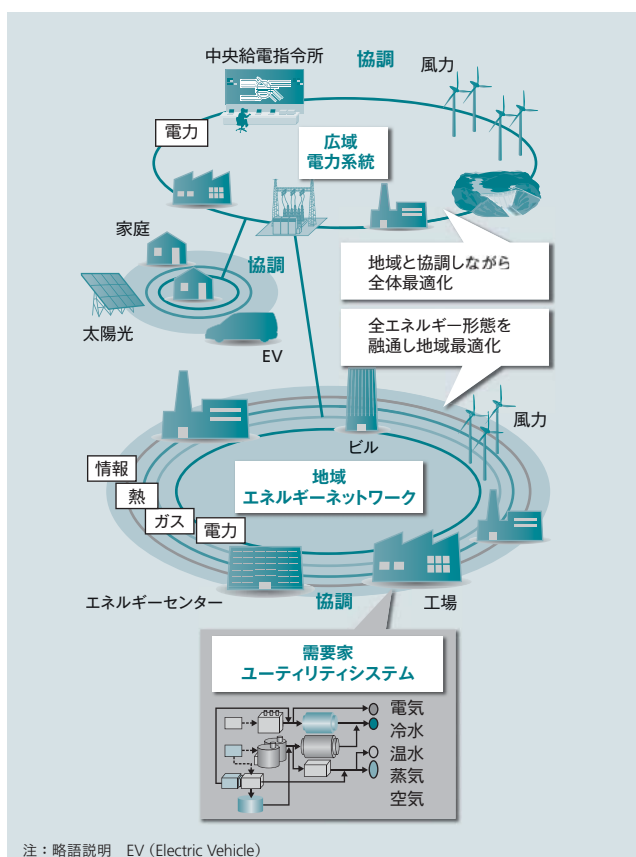


図1 | エネルギーインフラ

広域の電力系統，地域のエネルギーネットワーク，需要家のユーティリティシステムが接続して構成する。

2.1 概要

スマートグリッドは、電力の供給信頼性を維持し、低炭素化社会の実現と高効率な電力供給を支える次世代の電力流通システムとして期待されている。例えば、再生可能エネルギー連系の増大、EV導入の拡大など、電源と需要が多様化する中で、安定的かつ経済的な電力供給が求められる。しかし、具体的な実現には、さまざまな条件を考慮に入れた事前の方式検討が欠かせない。このような状況に対応して迅速なソリューション提案を行うため、制御機器や制御システムの導入効果を解析するエンジニアリング環境としてスマートグリッドシミュレータを開発した。

2.2 構成

電力システムの安定的な計画運用を実現するには事前の評価解析が不可欠であるが、当初から実システムを利用した実験を行うことは困難である。そこで、実際の系統を模擬して、仮想的な条件に基づいて電力の需要と供給を数値計算し、その結果を分かりやすく提示することを目的にしたシミュレータが不可欠になる。従来から同様の目的でシミュレータが開発されているが、大規模な系統構成と柔軟な機器構成の両立は十分ではない。

今回開発したスマートグリッドシミュレータは、分散エージェント型アーキテクチャによる潮流計算エンジンと、計算結果を分かりやすく表示する可視化画面を組み合わせで構成している。

(1) 潮流計算エンジン

電力系統を流れる電力量を数値計算で求めることを潮流計算と言う。分散エージェント型アーキテクチャは、配電系統、電圧制御機器、電気給湯器やEVなどの需要家機器、太陽光発電設備、需要家、各種の制御システムのモデルを個々のモジュールとして実装し、同時に独立して実行させ、モジュール間の通信メッセージで協調動作させることで潮流計算を実行する(図2参照)。モジュールはマスタモジュールを1つと、そのほかはスレーブモジュールに分類し、メッセージ交換によって連携する。マスタモジュールは、シミュレーション上の時刻を配信するなど、シミュレーション全体を管理する。

これにより、解析対象が柔軟にモデル化され、再生可能エネルギーが電力系統に与える影響の解析環境、電圧安定化制御、デマンドサイドマネジメントなどのプロトタイプ構築が短時間で可能となる。また、機能の追加/削除などのメンテナンスが容易になり、さらにモジュールの分散配置による規模拡張の対応も容易になる¹⁾。

シミュレータは、時間の経過に伴い繰り返し潮流計算を

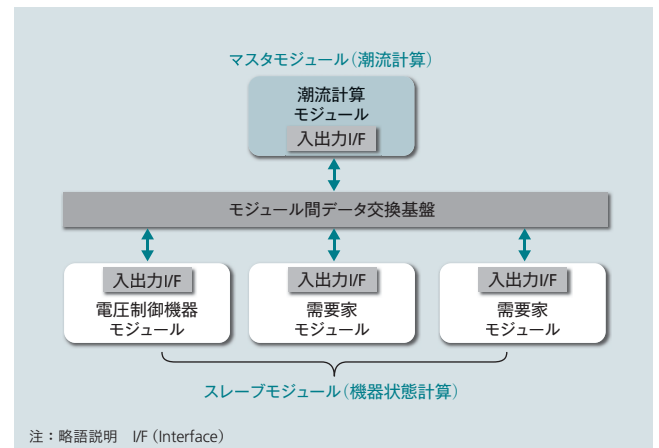


図2 | 分散エージェント型アーキテクチャ

機器、制御システムなどを個々のモジュールとして実装する。

行うことで、系統潮流の時間的な変化を模擬する。具体的には、系統潮流を計算する潮流計算処理と、機器の状態量を演算する処理を交互に繰り返す。ここで状態量とは、例えば、需要家の負荷量、分散電源の発電量、制御機器の制御量などである。潮流計算はマスタモジュールが、状態量の計算はスレーブモジュールがそれぞれ分担する。ある時刻においてスレーブモジュールは、前回時刻での潮流計算結果を用いて状態量を計算する。マスタモジュールは、その時刻の状態量を用いて潮流計算を実施する。

制御機器の例として、配電系統の電圧調整を行う電圧制御機器がある(表1参照)。これらの機器はスレーブモジュールとして実装し、前回時刻までの系統潮流および状態量に基づいて自機の状態量を計算する。そして、個々の電圧制御機器が独自に動作を行う分散制御であれば、計算結果を全体で共有できるようにメッセージを発行する。そのほかの制御方式は、状態量を集中的に管理してトップダウンで制御信号を発行する集中制御、隣接する制御機器が相互通信を行いながら制御を行う協調制御などが知られている。このシミュレータはさまざまな制御方式に柔軟に対応できることも特長である。

(2) 可視化機能

開発したシミュレータは、数値計算結果を分かりやすく表示するために可視化機能を併せて実装している(図3参照)。地理的に配置される電力系統を表示する地図モードと、その系統構成に着目する系統モードを用意している。

表1 | 電圧制御機器

主な電圧制御機器の種類と機能を示す。

電圧制御機器	機能概要
LRT	配電変電所において電圧調整のためのタップ切り替え
SVR	配電系統の線路において、LRTと同様の電圧調整のためのタップ切り替え
SVC	SVRと同様に線路において無効電力出力の調整

注：略語説明 LRT (Load Ratio Control Transformer), SVR (Step Voltage Regulator), SVC (Static Var Compensator)

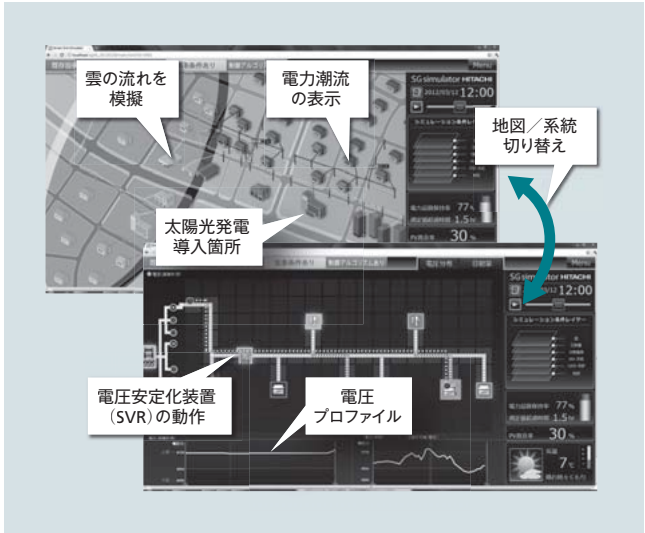


図3 | 可視化表示画面の一例

潮流計算の結果を分かりやすく表示する。

気象状況によって変動する太陽光発電と、それによって生じる系統電圧の変化、および電圧制御機器による安定化制御の結果を、画面を切り替えながら表示する。線路に沿った系統電圧のプロファイル表示、指定ノードの日単位の電圧表示などをマウスクリックで選択でき、操作性と表示内容の分かりやすさを実現した。また、系統電圧が高め低めに振れたときには警告色を出すなどのアラーム機能を備えている。この機能は、HTML(HyperText Markup Language)5を用いて実装している。

2.3 適用事例

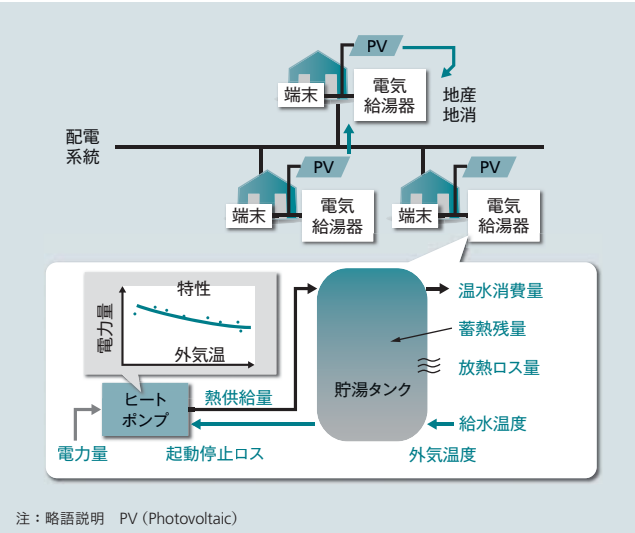
太陽光発電の地産地消に向けたプロトタイプを、スマートグリッドシミュレータで開発した事例を紹介する。太陽光発電の導入拡大時にはその余剰電力や逆潮流が電力系統に及ぼす影響が懸念されている。そこで、このプロトタイプでは、地域内の太陽光発電の余剰電力を、その地域内の電気給湯器の蓄熱運転に活用することで需給のアンバランスの吸収を図る。特長は、複数宅の電気給湯器を機器の効率特性や温水需要を考慮して最適な台数制御を行い、変動の吸収力と全体効率を最大化する点にある。

このプロトタイプは、表2に示すモジュールによって構成される。潮流計算モジュールは、需要家モジュールが模

表2 | モジュールと機能

主なモジュールの種類と機能を示す。

モジュール名	機能概要
潮流計算モジュール	配電系統の各点の電圧／電流などの状態値を計算
需要家モジュール	太陽光発電設備の発電量、電気給湯器の熱供給量や電力消費量、需要家の電力消費量や温水消費量を模擬
気象モジュール	気象シナリオデータを乱数で発生
制御サーバモジュール	複数宅の電気給湯器の蓄熱運転計画を策定するデマンドサイドマネジメント
メインモジュール	各モジュールを統括



注：略語説明 PV (Photovoltaic)

図4 | 太陽光発電の地産地消制御

太陽光発電の余剰電力を同じ地域内で消費して需給のバランスをとる。

擬する需要データを収集して配電系統全体の状態値を決定する。一方、需要家モジュールは潮流計算モジュールが模擬する連系点の電圧値を取得して、太陽光発電設備の電圧上昇抑制機能による発電量抑制を計算するなど、各モジュールが連動しながら動作する(図4参照)。

このプロトタイプを用いて一般家庭を対象としたケーススタディを行った結果、家1軒1軒の個別制御に対して、3軒全体での群制御により、余剰電力の吸収率を1.6倍に向上できる結果を得た。

そのほか、EVの普及拡大による電力系統への影響を緩和する充電調整制御²⁾、インセンティブによって需要家の需要量を目標値へ誘導するデマンドレスポンス制御のプロトタイプを開発した。潮流計算モジュールや需要家モジュールなどを活用することで短時間に構築することができた。

3. 地域エネルギーシステムシミュレータ

3.1 地域エネルギーネットワークシステム

近年、地球温暖化防止は喫緊の課題であり、エネルギー消費に伴うCO₂排出量の削減が求められている。より一層の省エネルギー・CO₂排出削減を実現するためには、地域内に分散したコージェネレーション、燃料電池、冷凍機などのエネルギー供給源、再生可能エネルギーおよび工場排熱や地下水などの未利用エネルギーをネットワーク化し、情報通信・制御技術の活用により、エネルギーを相互融通して最適な需給構造を実現する地域エネルギーネットワークシステムを構築する必要がある。

3.2 熱融通最適運転シミュレーション

地域エネルギーネットワークシステムでは、地域内で電

力と熱をベストミックスしてエネルギーの相互融通を行うが、蒸気、温水および冷水のような熱エネルギーは地域導管を用いて相互融通する。そのため、地域内での省エネルギー・CO₂排出削減を実現するためには、地域導管での放熱や圧力損失によるエネルギーロスを考慮したうえで、分散配置された熱源設備の運転を最適化する制御技術が必要となる。

これまで日立グループは、製造工場を対象としてエネルギー管理システムを開発し、工場内の省エネルギー・CO₂排出削減に貢献してきた³⁾。現在、この技術に基づき、再開地域や工業団地を対象とした地域内のエネルギー管理システムの開発を進めている。

その一環で、複数の熱源設備の運転と地域導管でのエネルギーロスを評価する配管網解析を連成した熱融通最適運転シミュレーション技術を開発した。ここでは、コージェネレーションで発生する排熱および太陽熱や地下水などの熱エネルギーを優先的に利用して熱源設備の消費エネルギーを低減し、配管網解析と連成することにより、運転効率の高い熱源設備からロスが小さい地域導管の経路を選択して需要家へ熱エネルギーを供給することが可能となる(図5参照)。

このシミュレーションを用いて、2つの地域で熱融通を行ったケースを対象にCO₂排出削減効果を試算した。このケースでは、夏季の冷水を供給する場合を評価した。想定する2つの地域は、夜間に冷水需要が大きい住宅地域と昼間に冷水需要が大きい商業地域であり、それぞれの地域にはエネルギー供給プラントが存在し、商業地域には、24時間ほぼ一定量の排温水を供給する清掃工場が存在するとした。さらに、住宅地域のエネルギー供給プラントは、商業地域に比べて効率が10%高いと仮定した(図6参照)。

熱融通をしない場合、商業地域のプラント2では、清掃

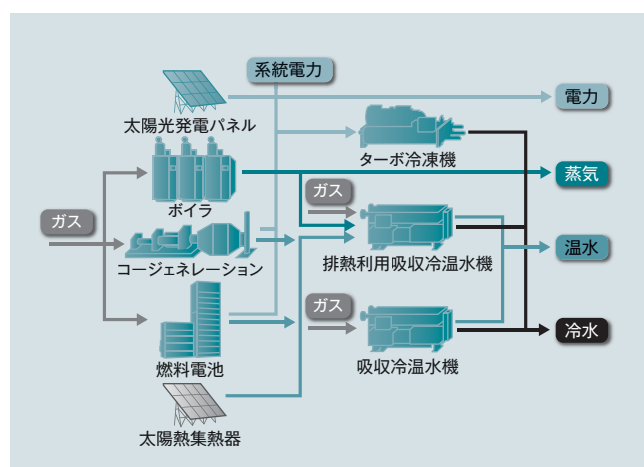


図5 熱源設備の最適運転

再生可能エネルギーおよび排熱を優先利用し、地域導管でのエネルギーロスを低減した熱源設備の運転最適化により、地域内のCO₂排出量を削減する。

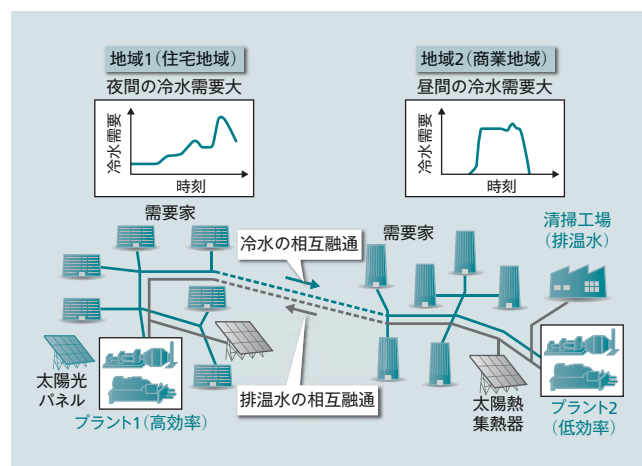


図6 熱融通効果の試算ケース

熱需要特性とプラント運転効率が異なる地域において、熱の相互融通によるCO₂排出削減効果を試算した。

工場の排温水は昼間しか利用されていないのに対して、熱融通をした場合、排温水は両地域で24時間有効利用されている。また、住宅地域でのプラント1の高効率の熱源設備が優先的に運転されている。その結果、熱融通をすることにより、地域導管での放熱および冷水と排温水の搬送動力によるCO₂排出量は増加しているが、熱融通をしない場合に比べて、全体のCO₂排出量は32%削減した(図7参照)。

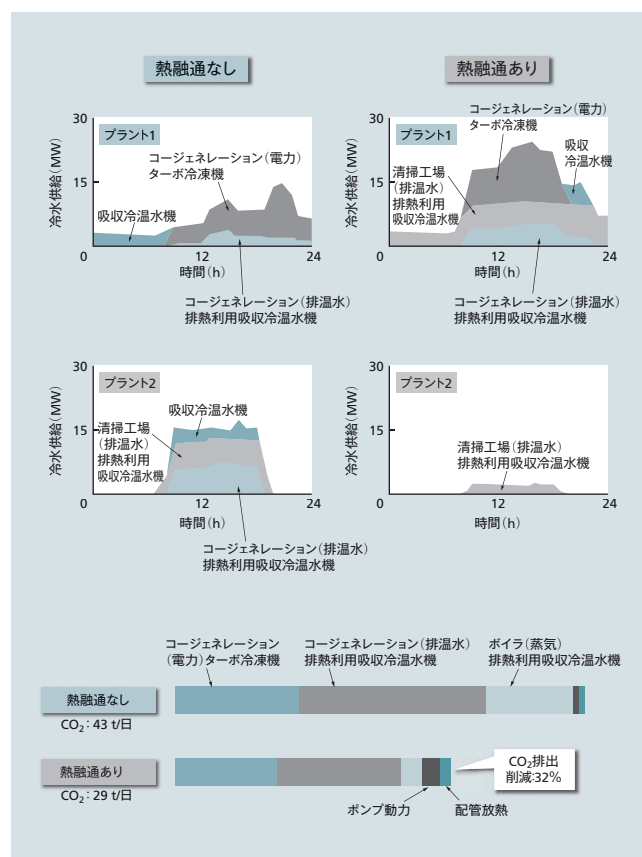


図7 熱融通効果の試算結果

排温水および高効率熱源設備の優先利用により、CO₂排出削減効果を確認した。

3.3 冷温水搬送動力最適シミュレーション

地域エネルギーネットワークシステムでは、地域導管を用いて冷温水のような熱エネルギーを融通する際、複数のポンプを使用する。従来のポンプ制御では、需要家に冷温水を安定して供給するために、需要家に設置した熱交換器にかかる圧力を一定に保ち、ポンプは定格回転数で制御する方式となっていた。この制御方式では、送水圧は高めに設定されており、必要以上の搬送動力を消費している。搬送動力を削減するには、各ポンプの回転数と各需要家のバルブ開度を最適化する必要がある。

これまで日立グループは、上水道の配水システムを対象として、貯水池から需要家へ流れる上水の配水シミュレータを開発してきた。冷温水搬送動力最適化シミュレータの開発では、配水シミュレータの機能を拡張し、配管網の圧力・流量バランスを制約条件とし、各ポンプの回転数と需要家のバルブ開度を最適化して冷温水搬送動力を最小とするシミュレーション手法を開発した⁴⁾。

この手法の省エネルギー効果を確認するため、2か所のエネルギー供給プラントと3か所の需要家から構成されるエネルギーネットワークを対象に試算した(図8参照)。その結果、各ポンプを定格回転数で運転する場合に比べ

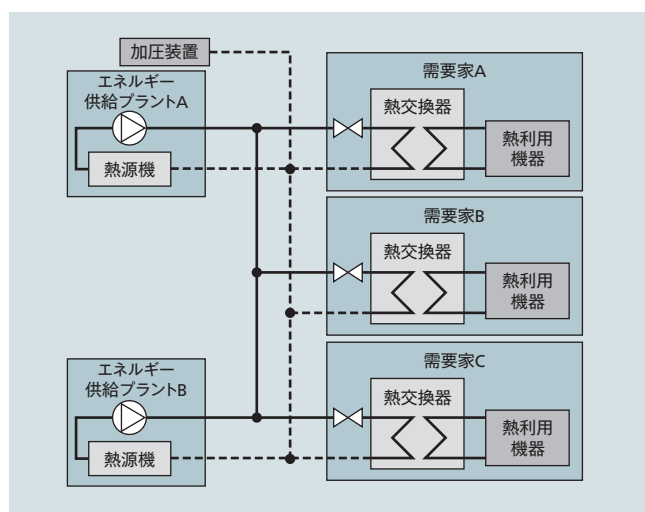


図8 搬送動力最適化の試算ケース

2か所のエネルギー供給プラントと3か所の需要家から構成されるエネルギーネットワークを対象に試算した。

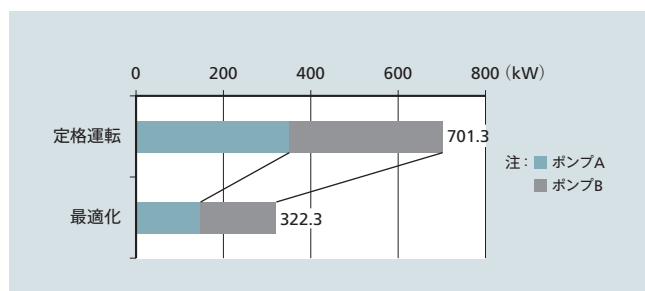


図9 搬送動力最適化の試算結果

ポンプ回転数と需要家の流量調整バルブ開度を最適化することにより、約54%の搬送動力を削減できることを確認した。

て、ポンプ回転数と需要家の流量調整バルブ開度を最適化することにより、約54%の搬送動力を削減できることを確認した(図9参照)。

以上の一連の熱融通に関わるシミュレーションを統合的に用いることにより、地域全体での省エネルギー・CO₂排出削減を実現する分散熱源設備の最適運転計画を立案することが可能となる。

4. ユーティリティシステム省エネルギー解析シミュレータ

電気や熱を多く使用する工場やビルにおいて、省エネルギーはエネルギーコスト低減とともに環境問題における重要な社会的責務となっている。以下では、需要家のユーティリティシステムの省エネルギー設計のためのエネルギー解析シミュレーション技術について述べる(図10参照)。

4.1 需要家のユーティリティシステムの省エネルギー

需要家では、生産プロセス、空調、照明、OA (Office Automation) 機器などに、電気、冷水、温水、蒸気、圧縮空気などの複数のユーティリティを利用する。電力やガスや燃料油といった一次エネルギーを調達し、ユーティリティシステムでそれらを変換して必要なユーティリティを生成している。ユーティリティシステムは、冷凍機、空気圧縮機、ファン、ポンプ、ボイラ、コージェネレーションなどの設備が配管類で接続されて全体が構成されるが、異なるユーティリティの間の融通もあり複雑である。また、その構成は需要家のユーティリティ需要に応じて設計される。

省エネルギーの手段には、機器の運転設定値の調整、機器の高効率機種へのリプレース、台数制御などのシステム制御の高度化、排熱回収などのエネルギーフローの改造などが考えられるが、投資対効果の観点から、省エネルギー効果を事前に解析することが重要である。

4.2 省エネルギー解析シミュレータの特徴

ユーティリティシステム省エネルギー解析シミュレータでは、省エネルギー改修前後の年間一次エネルギー量を計算して比較し、省エネルギー効果を評価する。与えられたシステム構成と、年間季節別代表週の1時間刻みの負荷データに対して、各1時間断面の一次エネルギー量を計算して年間集計する機能がコアになる。

任意のシステム構成のエネルギー量計算式を汎用的に自動生成するため、マルチユーティリティのエネルギー変換プロセスを、機器特性、エネルギーフロー接続、システム制御の組み合わせとして特徴づけ、オブジェクトモデルアーキテクチャによる一般化データモデルと、異なるユー

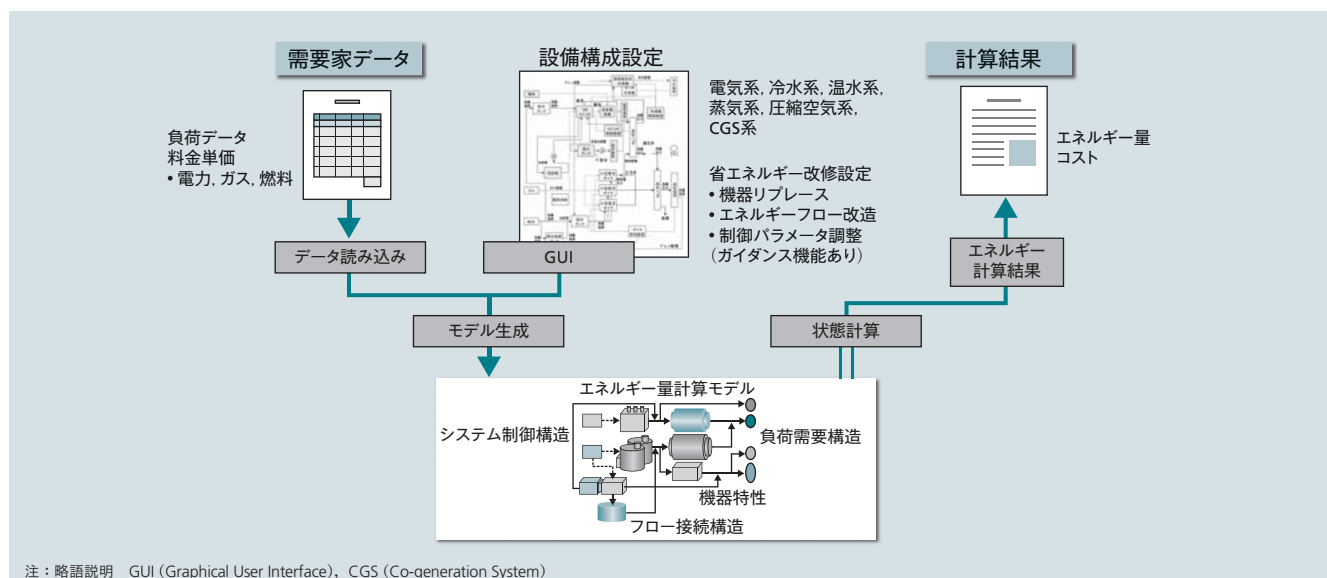


図10 ユーティリティシステム省エネルギー解析シミュレータの概要

任意のユーティリティシステム構成について年間一次エネルギー量をシミュレーションする。

ティリティ系や状態量の相互接続を一括して扱えるネットワーク状態計算モデルで構造化した。ユーザーはGUI (Graphical User Interface) 上で、各種の設備や制御装置、および配管類をツールボックスからのドラッグアンドドロップでブロック組み立て式に設備とその接続構造を定義することができる。

このシミュレータは、さらに機器DB (Database)、省エネルギー改修ガイダンス機能や、評価結果出力機能の各種支援機能を備えている。機器DBは、各種設備の機種ごとの機器特性をデータベースとして登録するものであり、ユーザーがリストから選択して機種変更を検討することができる。省エネルギーガイダンス機能は、省エネルギー改修メニューを指定すると、設定されたユーティリティシステム構成において改修対象候補となる設備をネットワーク探索し、その仕様変更に関する参考値をガイダンスするものである。これらにより、熟練者の省エネルギーノウハウの共有化を実現している。

今後、設備や省エネルギーノウハウのモデルを拡充し、実用性向上と適用範囲拡大をさらに図っていく予定である。

5. おわりに

ここでは、需要家から地域や電力システムまでのエネルギーインフラの設計、制御、診断、保守、改修のライフサイクルを支えるシミュレーション技術について述べた。

マルチユーティリティや需給の連携など、各種協調によって全体最適なエネルギーインフラを実現するトータルなソリューションの迅速な開発と提案が期待されている。今後も最先端のシミュレーション技術を駆使して、低炭

素、高効率、高信頼のエネルギーシステムの実現に貢献していく考えである。

参考文献

- 1) 小林, 外: 分散エージェント型配電系統解析システムの開発, 平成24年 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会 (2012.8)
- 2) T. Ishida: Feasible Study for the Availability of Electric Vehicles for the Stable Operation in Power System Network, EVTeC'11, SS-5-20117248 (2011.5)
- 3) 河野, 外: 環境・CO₂削減ソリューションー製造業向けユーティリティソリューションー, 日立評論, 92, 6, 426~431 (2010.6)
- 4) 中野, 外: 地域冷暖房システムの冷温水搬送動力最小化方式, 平成25年電気学会全国大会, No.3-097 (2013.3)

執筆者紹介



富田 泰志

1990年日立製作所入社, 日立研究所 エネルギー・環境研究センター エネルギーマネジメント研究部 所属
現在, エネルギーインフラシステムの研究開発に従事
電気学会会員, IEEE会員



犬塚 達基

1990年日立製作所入社, 日立研究所 エネルギー・環境研究センター エネルギーマネジメント研究部 所属
現在, エネルギーシミュレーションの研究開発に従事
電子情報通信学会会員, IEEE会員



河村 勉

1989年日立製作所入社, 日立研究所 エネルギー・環境研究センター エネルギーマネジメント研究部 所属
現在, エネルギーソリューションの研究開発に従事
博士(工学)



中野 道樹

2006年日立製作所入社, 横浜研究所 情報サービス研究センター 社会インフラシステム研究部 所属
現在, 社会インフラのシステム計画・制御の研究開発に従事
電気学会会員