

統合 EMS プラットフォームによる最適運用計画機能構築フレームワーク

A Framework for Optimal Planning Systems on the EMS Platform

川村 雄 KAWAMURA Yu

堀口 浩 HORIGUCHI Hiroshi

大野 健 ONO Takeshi

省エネルギー化をいっそう進めるため、電気・熱などのエネルギー需要量と自家発電設備の電力供給量を統合して管理・運用することが必要となってきた。富士電機は、統合 EMS プラットフォーム上で動作する最適運用計画機能構築フレームワークを開発した。このフレームワークは、画面上で設備の配置と接続を行うことでプラントのモデルを自動で生成する統一エネルギーネットワークモデルと、このモデルを用いて運用計画を立案する最適運用計画立案機能を持つ。これにより、専門のエンジニアでなくても設備構成や特性の変更などのメンテナンスが行え、運用計画の立案が容易になる。

To promote further energy savings, the demand for electrical, thermal and other types of energy and the amount of energy supplied by self-generation facilities must be integrally managed and planned. Fuji Electric has developed a framework for optimal planning systems that runs on the integrated EMS platform. This framework has a uniform energy network model that automatically generates a plant model according to the arrangement and connection of equipment on a display screen, and an optimal planning function that develops operational plans. As a result, the configuration and properties of the equipment can be changed and maintenance can be performed without the need for a professional engineer, and operational planning becomes easier.

1 まえがき

世界のエネルギー需要と CO₂ 排出量が増え続ける中、持続可能な社会を実現するため、再生可能エネルギーの導入や省エネルギー（省エネ）への取り組みが進んでいる。工場やビルなどの需要家サイドにおいては、従来の省エネ型設備への置換えにとどまらず、太陽光発電設備やコージェネレーション設備などの自家発電設備の導入が増えてきている。さらなる省エネを実現するためには、電気・熱などのエネルギー需要量とユーティリティ設備（工場・事務所などにエネルギーを供給する発電・熱源などの設備）のエネルギー供給量を統合して管理・運用する仕組み作りが必要である。このため、エネルギーの見える化を主な目的とする従来の EMS (Energy Management System) の機能に加えて、エネルギーの発生量予測と需要予測に基づいたユーティリティ設備の運用計画の立案や制御を行う機能（最適運用計画機能）は、これまで以上に大きな役割を担うこととなる。

富士電機は、これまで電力、鉄鋼、水処理、産業、店舗流通などの分野においてエネルギーの需給に着目した最適運用計画機能を開発してきた^{(1)~(6)}。今後ますますニーズが多様化する運用計画システムを迅速に提供するため、従来の開発で得た需要家サイドのエネルギー最適運用に関する知見を基に、統合 EMS プラットフォーム上で動作する最適運用計画機能構築フレームワークを開発した。このフレームワークの特徴は、プラントモデルの作成機能やシミュレーション機能などによる高いユーザビリティと、計画立案機能を柔軟に選択することで運用性の高い計画の立案ができることである。

本稿では、統合 EMS プラットフォームの概要、ならびに最適運用計画機能構築フレームワークの特徴と適用事例

について述べる。

2 統合 EMS プラットフォーム

図 1 に、統合 EMS プラットフォームとその周辺機能の構成を示す⁽⁷⁾。統合 EMS プラットフォームは、EMS を構築する上で核となるミドルウェアであり、実績データ管理と、センサやコントローラなどの現場機器との通信を管理するドライバ管理など、一般的な EMS が持つ機能を備えている。さらに、次に示す三つの機能も併せ持っている。

(1) 高速プログラム連携サービス「Fuji Service Bus」

EMS のサーバ構成は、制御対象の規模、要求される機能の数、監視制御の周期、サーバの冗長性などに応じて、シングルサーバ構成から十数台に及ぶ分散サーバ構成までさまざまな形態を取る。Fuji Service Bus は、このようなサーバ構成を意識することなく、各サーバに分散配置されている各種プログラム間、あるいはプログラムと Web 画面間の処理を連携させる機能である。この機能により、ユーザは統合 EMS プラットフォーム上のプログラムの機能拡張や削除を容易に行うことができる。

(2) 統一エネルギーネットワークモデル

統一エネルギーネットワークモデルは、電力、ガス、蒸気などのエネルギーが制御対象の各機器においてどのように変換・伝達されるかを定義したモデルである。電気、ガス、蒸気などの熱エネルギーの生成や消費を行うプラント内ユーティリティ設備の運用計画を立案するためのものである。

(3) 高速データ共有サービス「Field Connector」

Field Connector は、統合 EMS プラットフォーム上の各種プログラムがサーバ構成を意識することなく、オンラインデータの参照や制御指示が行えるようにするための機

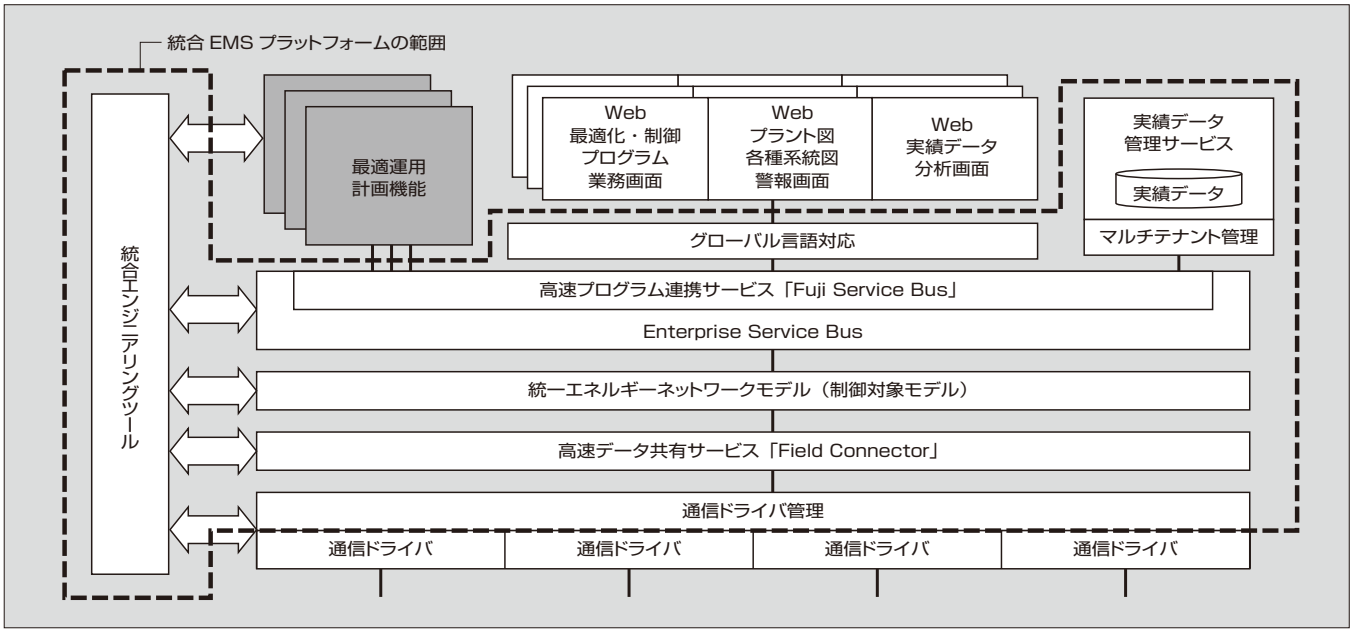


図1 統合EMS プラットフォームとその周辺機能の構成

能である。TAG 管理（“TAG001” などの TAG 名とその TAG 値でデータ管理する方式）によってオンラインデータや実績データ、予測データを管理する。

3 最適運用計画機能構築フレームワーク

最適運用計画機能構築フレームワークは、統合 EMS プラットフォーム上で動作する最適運用計画機能を開発するためのプログラムの集合体である。主な特徴は次のとおりである。

- (a) 統一エネルギーネットワークモデルや計画立案アルゴリズム（最適運用計画立案機能）などの計画立案システムの構築において必要となる機能群を提供する。
- (b) 統一エネルギーネットワークモデルによって、対象とするプラントとエネルギー種別を限定することなく、エネルギーフローの観点からプラントのモデルを作成する。このプラントモデルの解析・変換ツールを提供する。
- (c) 最適運用計画立案機能は、ユーティリティ設備の運用計画を立案するため、消費電力を含むエネルギーコスト・CO₂ 排出量の最小化を目的関数とする最適化アルゴリズムを提供する。この最適化アルゴリズムは、複数の方式から、設備の入出力特性や制約条件などの対象プラントの特性に適した方式をプログラム構築段階で選択できる。

3.1 最適運用計画機能構築フレームワークの構成

図 2 に、最適運用計画機能構築フレームワークとその周辺機能の構成を示す。最適運用計画機能構築フレームワークは、次の構成要素から成る。

(1) 最適運用計画立案機能

最適運用計画の立案を行う。この機能は次の要素から構

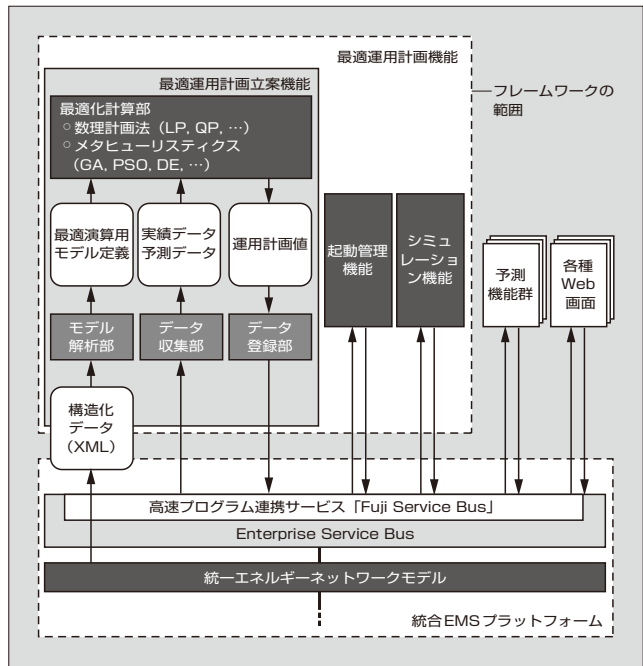


図2 最適運用計画機能構築フレームワークとその周辺機能の構成

成される。

- (a) 構造化データ [XML (Extensible Markup Language) ファイル]
プラントのモデリングを行うための統一エネルギーネットワークモデルの出力ファイルである。
- (b) モデル解析部
XML ファイルを解析して最適化計算部が要求するモデル形式（最適演算用モデル定義）に変換する。
- (c) データ収集部
運用計画の立案に必要な実績データ・予測データを統合 EMS プラットフォーム配下のデータベースから

収集する。

(d) 最適化計算部

最適演算モデル定義と収集したデータから最適演算を行い、運用計画を立案する。

(e) データ登録部

計算した運用計画値を、統合 EMS プラットフォーム配下のデータベースに格納する。

(2) 起動管理機能

予測機能などの他の機能との連携起動、ならびに最適運用計画立案機能の起動タイミングを管理する。

(3) シミュレーション機能

実運用に入る前に、運用計画値の妥当性を検証するため、複数の運用ケースで運用計画を計算し、画面上に表示する。

また、最適運用計画機能構築フレームワークには含まれないが、運用計画を立案する上で重要となる機能として、電力需要予測や太陽光発電の発電量予測などを行う予測機能群と、最適運用計画立案機能や予測機能に関連する各種 Web 画面がある。

3.2 統一エネルギーネットワークモデル

消費電力を含むエネルギーコストまたは CO₂ 排出量を最小化する運用計画は、最適化アルゴリズムを用いて立案する。そのためには、計画立案対象のエネルギーの伝達関係を数式で記述する必要がある。従来は、最適化を熟知したエンジニアが、アルゴリズムに適したモデル表現方式を選んで、直接数式を記述することでモデリングを行ってきた。このような方式では、プラント内の設備の増減や、経年劣化などによる特性変化が生じると、その都度、数式モデルを修正しなければならなかった。

この問題を解決するため、一般のユーザがシンプルな作業によりプラントを定義し、プラントのモデルを自動で生成する統一エネルギーネットワークモデルを開発した。

統一エネルギーネットワークモデルでは、グラフによりプラントのエネルギーフローを表す。ここで木構造の接点(ノード)が設備を表し、枝が設備間の接続関係を表す。

図 3 に、統一エネルギーネットワークモデルの定義画面の例を示す。ユーザは、ノードを画面右端のシンボルリストから選択して、画面中央のモデル定義ウィンドウに配置し、プロパティ入力ウィンドウを開いて、変換効率の係数や上下限特性などの値を入力する。機器の接続関係は、配置されたノードの入出力を信号線で結ぶことで定義する。このようにして定義されたモデルは XML データとして出

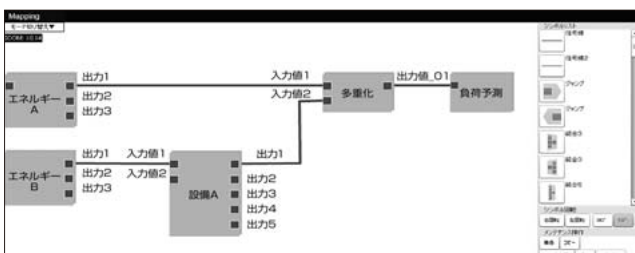


図 3 統一エネルギーネットワークモデルの定義画面の例

力され、モデル解析部により最適化計算部が要求するファイル形式に変換される。

3.3 最適化計算部

最適化計算部は、計画立案アルゴリズムの核となる機能である。統一エネルギーネットワークモデルに記載されたプラントの情報と、実績データおよび予測データに基づいて、エネルギーコストあるいは CO₂ 排出量を最小化するプラント内の各種ユーティリティの運用計画を出力する。

ユーティリティ設備の運用計画の最適化は、各エネルギーの需給バランス、機器の機械的制約および運用制約を考慮した上で、運用コストあるいは CO₂ 排出量の最小化を達成する機器の起動・停止(離散量)と機器の出力(連続量)を同時に決定する最適化問題となる。従来、このような運用計画の最適化問題では、機器の特性や制約などを線形近似した上で、混合整数計画問題として定式化して解いていた。しかし、より省エネ性が高く、実運用に耐えるだけの運用解を得るためには、厳密な機器の特性や現場の運用ルールなどの制約条件を考慮する必要がある。これらを考慮しない場合、エネルギー消費量の計算値が実際の値と異なった値となること、ならびに運用ルールを守らない運用計画値を出力し、必ずしも狙った通りの省エネにつながらないことなどの問題が発生する。したがって、機器および運用ルールの非線形特性を考慮した、混合整数非線形計画問題として定式化して解く必要がある。一般的に、このような問題は効率的に最適解を求めることが難しいとされている。

富士電機では、この問題を解決するために独自のアルゴリズムを開発した。最適解の探索方法として、PSO⁽⁸⁾(Particle Swarm Optimization) 手法や DE^{(9), (10)}(Differential Evolution) などの最新のメタヒューリスティクス最適化技術⁽¹¹⁾を核とし、ユーティリティ設備の運用計画の立案に関するさまざまなノウハウを加えたものである。これにより、従来は実用的な計算時間で解くことが困難であった混合整数非線形計画問題の高精度な解を、30 分以内(30 分同時同量を想定)で求めることを可能とした。

また、上述のアルゴリズム以外にも、ユーティリティ設備の入出力特性や制約などが 1 次もしくは 2 次関数でモデル化できる場合には、より短時間で問題を解くことができる数理計画アルゴリズムも用意している。

なお、計算機に搭載される CPU は、クロック数で処理性能を上げる方針から、コアを複数にすることで計算性能を上げるように設計方針が変化してきており、マルチコア CPU が一般的なものになってきている。このため、大規模な問題に対しても、所望の時間内で高品質な解を得られるように、最適化アルゴリズムの並列化の研究開発を進め、マルチコア CPU での高速演算を可能としている。

3.4 起動管理機能

最適運用計画立案機能は、30 分または 1 時間ごとに定周期で起動要求がかかり、予測機能が立てた需要予測値あ

るいは別の運用計画プログラムが立案した運用計画値に基づいて、ユーティリティ設備の運用計画を立案する。

起動管理機能は、あらかじめ定義された起動周期（30分や1時間など）と起動順序（発電予測、需要予測、運用計画機能など）に従って、予測機能ならびに上述の最適運用計画立案機能に起動要求をかける機能である。本機能により、予測演算から最適運用計画の立案までの一連のタスクが定周期で管理・実行される。

3.5 シミュレーション機能

運用計画システムの導入の際や導入後に設備に変更があった場合、さまざまな運用状況を想定したデータを用いて、立案した運用計画の省エネ性能、運用可能性の検証が必要となる。この検証には、運用計画機能をバッチ処理で実行し、立案した結果をシミュレーション機能で確認する。

シミュレーション機能は、最適運用計画立案機能の入力データを所望のデータにした上でこれをバッチ的に呼び出す機能と、その結果を画面で確認する機能からなる。

シミュレーション機能では、さまざまなパターンのデータを入力する手段として、図4に示すデータ入力画面を用いる。任意の時刻を指定して、あらかじめ立案した予測データ群から入力データを取得する。このデータが検証内容に不適切な場合は、データ入力フィールドに展開された値をユーザが任意の値に変更することで調整できる。

運用計画結果を確認する手段は2種類ある。一つはデータ値を画面で確認する方法、もう一つはグラフで確認する方法である。データ値の確認は、データ入力画面で行う一方、グラフによって結果を確認する場合、プラント種別、評価・検討を行う事象によってグラフ化するデータや、用いるグラフの種類が異なる。そこで、シミュレーション機能では、グラフ定義という操作であらかじめデータやグラフの種類を定義して評価・検討を行う運用計画データをひも付けることにより、さまざまなグラフを出力できるようにしている。グラフ定義は図5に示すグラフ定義画面で行う。グラフ作成に関する一般的な設定項目を選択することができる。

項目種別	項目名	変動種別	固定値	取得有無	delta値	単位	00:00:0000:30:00
1	dummy	燃料消費量	固定	取得	null	kg/h, l/h, Nm3/h	
2	dummy	燃料消費量	固定	取得	null	kg/h, l/h, Nm3/h	
3	dummy	発電予測値	固定	取得	null	kW	
4	dummy	燃料消費量	固定	取得	null	kg/h, l/h, Nm3/h	
5	dummy	燃料消費量	固定	取得	null	kg/h, l/h, Nm3/h	
6	dummy	水入流量	固定	取得	null	Nm3/h	268.42592; 268.32492
7	dummy	水入流量	固定	取得	null	Nm3/h	
8	dummy	水入流量	固定	取得	null	Nm3/h	0
9	dummy	水入流量	固定	取得	null	Nm3/h	0
10	dummy	水入流量	固定	取得	null	Nm3/h	0
11	dummy	水入流量	固定	取得	null	Nm3/h	0
12	dummy	水入流量	固定	取得	null	Nm3/h	268.42592; 268.32492
13	dummy	水入流量	固定	取得	null	Nm3/h	
14	dummy	水入流量	固定	取得	null	Nm3/h	
15	dummy	水入流量	固定	取得	null	Nm3/h	
16	dummy	水入流量	固定	取得	null	Nm3/h	
17	dummy	水入流量	固定	取得	null	Nm3/h	26891.936; 26867.154
18	dummy	水入流量	固定	取得	null	Nm3/h	
19	dummy	水入流量	固定	取得	null	Nm3/h	
20	dummy	水入流量	固定	取得	null	Nm3/h	
21	dummy	水入流量	固定	取得	null	Nm3/h	

図4 シミュレーション機能のデータ入力画面



図5 シミュレーション機能のグラフ定義画面

4 製鉄所向け EMS への適用

最適運用計画機能構築フレームワークを用いて開発した製鉄所向け EMS パッケージ「鉄鋼 EMS パッケージ」を適用事例として説明する（177 ページ「製鉄所のエネルギー管理を最適化する「鉄鋼 EMS パッケージ」」参照）。

「鉄鋼 EMS パッケージ」は、そのシステム構成を図6に示すように、最適運用計画立案機能群、起動管理機能、シミュレーション機能、予測機能から構成される。最適運用計画立案機能群は、ホルダ設備最適運用、酸素設備最適運用、発電設備最適運用、全体最適運用からなる。予測機能は、製鉄所内のガス需要量ならびに電力使用量を予測する需要予測からなる。最適運用計画立案機能群におけるそれぞれの最適化では、関連する予測機能が立案するエネルギーの発生・使用量の予測に基づいて運用計画を立案するため、需要予測と連携する。

ホルダ設備最適運用、酸素設備最適運用および発電設備最適運用には、5分に1回という高速な計算が要求される。このため、酸素設備最適運用と発電設備最適運用は、高速演算が可能なアルゴリズムを適用して実現している。ホルダ設備最適運用は、アルゴリズムに並列化メタヒューリスティクスを用いることで高速化を実現している。全体最適運用は、1日に1回定周期で起動されるが、運用計画を立案する規模が大きくなるため、この機能についてもマルチ

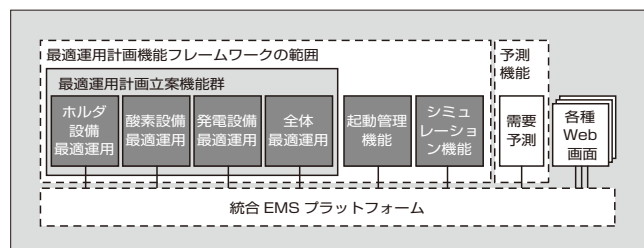


図6 「鉄鋼 EMS パッケージ」のシステム構成

コア CPU の並列化処理により高速化を実現した。

さらに、鉄鋼 EMS パッケージでも効果の試算や設備パラメータ変更時の検証が必須となるため、前述したシミュレーション機能を適用することで、事前に運用計画が妥当かを確認できる。

5 あとがき

統合 EMS プラットフォーム上で動作する最適運用計画機能構築フレームワークについて述べた。

今後は、最新の最適化計算アルゴリズムの追加、ならびに統一エネルギーネットワークモデルやシミュレーション機能などのエンジニアリングツールのユーザビリティの強化などの開発を継続し、運用計画機能の高度化を通じて、持続可能社会の実現に向けて貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 東谷直紀ほか. 需要家向けエネルギー・環境ソリューション. 計測技術. 2010-9, p.16-19.
- (2) 西田英幸ほか. オンライン最適化技術と制御プラットフォーム「FeTOP」. 富士時報. 2006, vol.79, no.3, p.274-278.
- (3) 項東輝ほか. 原動力設備プラントの最適運用と適用事例. 富士時報. 2004, vol.77, no.2, p.166-170.
- (4) 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. 2002, vol.75, no.11, p.625-629.
- (5) 小出哲也ほか. エネルギープラントの最適運用システム. 富士時報. 2008, vol.81, no.2, p.130-134.
- (6) Kitagawa, S. et al. Development of an optimal operation planning system for energy plants in steelworks, Proceeding of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, July 6-11, 2008, p.13950-13951.

- (7) 堀口浩ほか. 統合エネルギーマネジメントシステムプラットフォーム. 富士時報. 2011, vol.84, no.3, p.214-218.
- (8) Kennedy, J. and Eberhart, R. Particle Swarm Optimization. Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks. 1995, vol.IV, p.1942-1948.
- (9) Storn, R. et al. Differential evolution - A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. J. Global Optimization. 1997, vol.11, p.341-359.
- (10) Suzuki, R. et al. The ϵ Constrained Differential Evolution Approach for Optimal Operational Planning of Energy Plants. WCCI 2010 IEEE World Congress on Computational Intelligence. 2010, p.4312-4317.
- (11) 相吉英太郎ほか. メタヒューリスティクスと応用. 電気学会. 2007.



川村 雄

数値アルゴリズムの省エネソリューションへの応用に関する研究・開発に従事。現在、富士電機株式会社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。IEEE 会員、計測自動制御学会会員、システム制御情報学会会員。



堀口 浩

監視・制御システム分野におけるソフトウェア技術基盤の企画・開発に従事。現在、富士電機株式会社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主査。



大野 健

エネルギーマネジメントシステムの開発・技術部業務に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部社会システム事業部電力流通システム部課長。





*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。