

ESWare™を用いたエネルギー貯蔵システムの構成・運用最適化

Optimization of Configuration and Control of Energy Storage Systems Using ESWare™

Marco Ferrara IHI INC. Project Division, Energy Storage Department Ph. D.
小 熊 祐 司 技術開発本部総合開発センター制御技術開発部 博士（工学）

近年、欧米では再生可能エネルギーや分散電源の導入が盛んであり、電力事業者は系統を柔軟かつ最適に運用する新たなビジネスモデルの確立を目指している。この目的に対して、蓄電池などによるエネルギー貯蔵システムを導入する例がみられるが、システムの最適な構成と運用の決定方法は依然として大きな課題となっている。本稿では、この課題を解決するソフトウェア・プラットフォームである ESWare に関して、概要およびコア技術である最適化技術、ならびに適用例を紹介する。

Recently, in Europe and the United States, the number of distributed energy resources and renewable energy generators has increased drastically. In response to this, electric power players aim to build new business models based on flexible and optimal grid operation. They often introduce Energy Storage System (ESS) such as rechargeable battery; however, it is still difficult to determine the optimal configuration and operation is still difficult problem. In this paper, as a solution for this issue, we overview our software platform ESWare including optimization technology as the core technology, and applications.

1. 緒 言

近年、ヨーロッパでは、再生可能エネルギーと分散電源の導入によって電力業界の勢力地図は塗り替えられ、ヨーロッパ上位 20 の電力事業者の時価総額はわずか 5 年で 5 000 億ドル下落している⁽¹⁾。アメリカの電力事業者もやがて同様の問題に直面することが想定されており⁽²⁾、これに備え、再生可能エネルギーと負荷、分散電源を統合し、柔軟に運用するためのビジネスモデルを確立することが求められている。このようなビジネスモデルにおいて、エネルギー貯蔵システムは極めて重要な役割を担うことになるが、構成と運用が最適になっていないと、収益性が大幅に損なわれる可能性がある。

この課題に対して、現在アメリカの電力事業者、独立系統運用機関 (ISO)、および独立系発電事業者 (IPP) は、エネルギー貯蔵システムの構成と運用の最適化に多大な時間と労力を費やしている。その検討の多くは、手作業または表計算ソフトウェアでの試行錯誤によるもので、多くの時間と人的コストが掛かるのみならず、必ずしも妥当な結果が得られるとは限らない。この目的に対して、需要や再生可能エネルギー発電量を予測して、エネルギー貯蔵システムの運用最適化を行う分析ツールがあるが、それらのほとんどは実績の需要や再生可能エネルギー発電量が予測どおりとなるという仮定に基づいており、これらの予実差を

考慮した、実際の制御に反映可能な形でエネルギー貯蔵システムの運用計画を導くことは困難である。IHI グループの ESWare ソフトウェア・プラットフォームは上述の問題点を解決し、ユーザにエネルギー貯蔵システムの最適な構成・運用を提供することができる。

本稿では、まず 2 章で ESWare ソフトウェア・プラットフォームの概要を説明し、次の 3 章では ESWare の中核をなす最適化技術について説明する。4 章では、3 章で述べた最適化技術に基づくソフトウェアとして、ES/Analyzer、ES/Optimizer について述べる。これらはそれぞれエネルギー貯蔵システムの構成、および運用の最適化に対応するソフトウェアである。5 章では、ES/Analyzer、ES/Optimizer の適用事例として、ES/Analyzer を用いたピークシフトのためのエネルギー貯蔵システムの最適構成決定、ES/Optimizer を用いた電力ピークシフトの 2 例について述べる。最後に 6 章では本稿の内容をまとめる。

2. ESWare の概要

ESWare は、IHI グループが提供するエネルギー貯蔵システムの構成・運用最適化、および制御ソフトウェアであり、互いに協調する以下の三つのソフトウェア環境によって構成される。

- (1) プロジェクト構築前に分析を行って最適な構成を決定する (ES/Analyzer)。

- (2) 一貫したシステムの運用計画最適化を現場で実施する (ES/Optimizer).
- (3) 物理ハードウェアを堅固かつ安全に制御する (ES/Pilot).

ESWare 内のツールの階層および機能を第 1 表に示す。

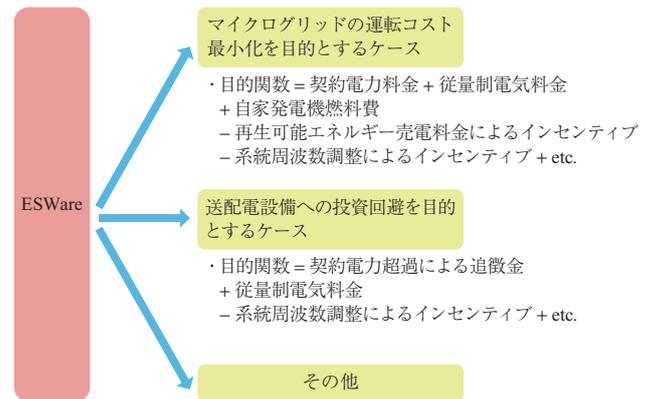
3. ESWare の最適化技術

ESWare の中核をなすのはエネルギー貯蔵システムの運用計画最適化技術である。ESWare では、予測需要、再生可能エネルギー予測発電量、電力価格など、電力システムの収益に直接影響する要因を考慮した最適化モデルのもとで、収益を最大化するためのエネルギー貯蔵システムの運用計画を非線形最適化アルゴリズムによって求める。第 1 図に、ESWare の最適化モデルの概念図を示す。

本最適化モデルは、エネルギー貯蔵システムの構成最適化、運用最適化の両方で使用する。これによって、構成最適化で見積もった経済性を実際の運用においても（予実差による影響を除いて）達成することができる。

ESWare の最適化モデルは表現力に富んでおり、案件や

顧客に応じたさまざまな目的関数を定義可能である。第 2 図に ESWare による最適化ケースと目的関数の例を示す。ES/Analyzer は、マイクログリッド向けの複雑な電力に関する収支を想定しており、契約電力や従量制の電気料金のほか、たとえば周波数調整や再生可能エネルギー売電によるインセンティブなども考慮できる。

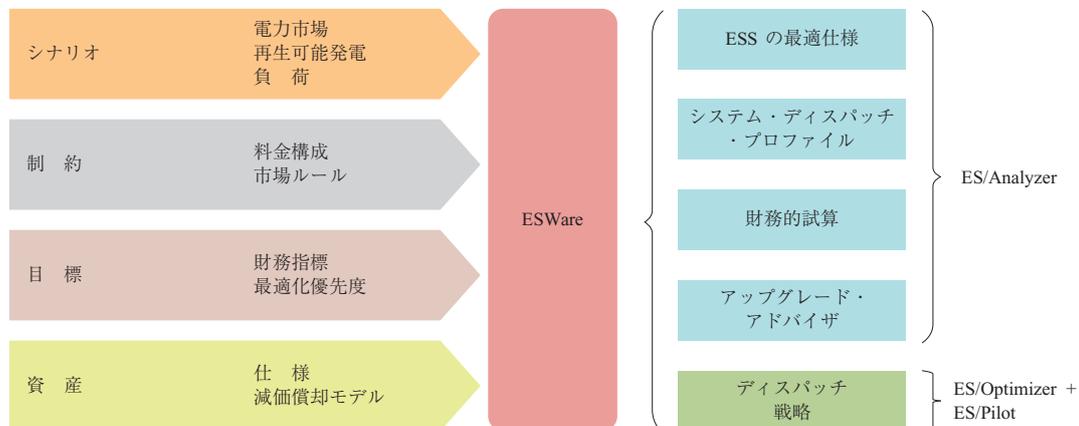


第 2 図 ESWare による最適化ケースと目的関数の例
Fig. 2 Examples of ESWare's optimization cases and their cost functions

第 1 表 ESWare のソフトウェア構成と機能
Table 1 Software components and functions of ESWare

階	層	ツール	機能	運用
分析ツールとして		ES/Analyzer	<ul style="list-style-type: none"> ・収益化するサービスを選択 ・ディスパッチ戦略を理解 ・最適なシステム仕様を認識 ・プロジェクトの収益性 /IRR/ROI を確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・営業 ・アプリケーション ・エンジニアリング ・プロジェクト計画 ・プロジェクト開発
リアルタイム最適化ツールとして		ES/Optimizer	<ul style="list-style-type: none"> ・最低コストで構成する最良の戦略を実現 ・予測に合致する方法によるディスパッチ ・最適な運用/保守および保証条件を構成 	<ul style="list-style-type: none"> ・資産管理 ・運用 ・保守
低レベル・コントローラとして		ES/Pilot	<ul style="list-style-type: none"> ・最適化された動的運用 ・複数ベンダのものを統合 ・スケーラブル 	

(注) IRR: 内部収益率
ROI: 投下資本利益率



第 1 図 ESWare の最適化モデル概念図
Fig. 1 Conceptual diagram of ESWare's optimization model

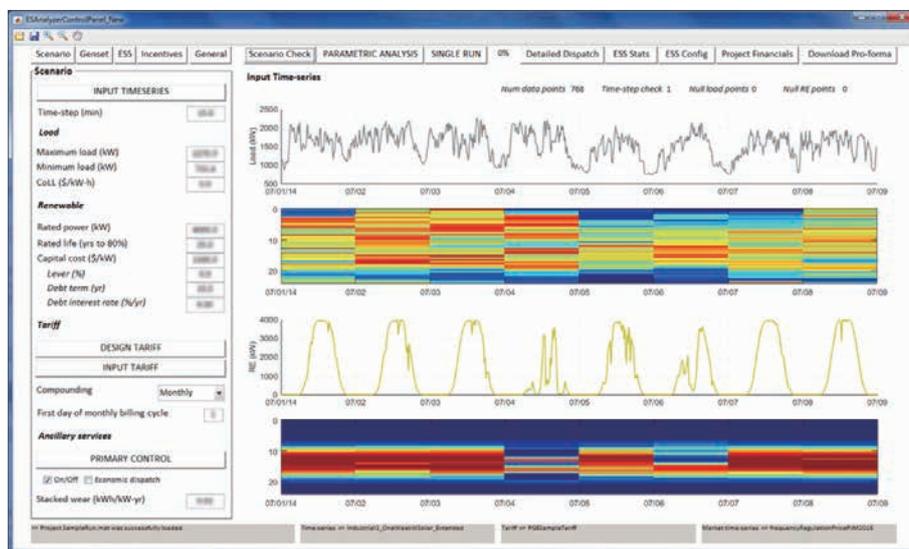
4. ESWare 最適化技術を実現するソフトウェア

4.1 ES/Analyzer

ES/Analyzer は、3章で述べた最適化技術を組み込んだオフラインでのグリッド運用シミュレーションソフトウェアであり、エネルギー貯蔵システムの経済性評価、またそれに基づくエネルギー貯蔵システムの構成最適化が可能である。

(1) ユーザインタフェース

ES/Analyzer のユーザインタフェースを第3図に示す。ユーザインタフェースは、パネル左側の入力部と右側の出力部で構成されている。



第3図 ES/Analyzer のユーザインタフェース
Fig. 3 User interface of ES/Analyzer

(2) シナリオの読み込み

ES/Analyzer の実行に先立ち、ユーザインタフェースの上部にあるボタン「INPUT TIMESERIES」をおして、シミュレーションで参照するシナリオ（負荷、再生可能エネルギー発電量、電力量料金などの時系列データ）を指定する。

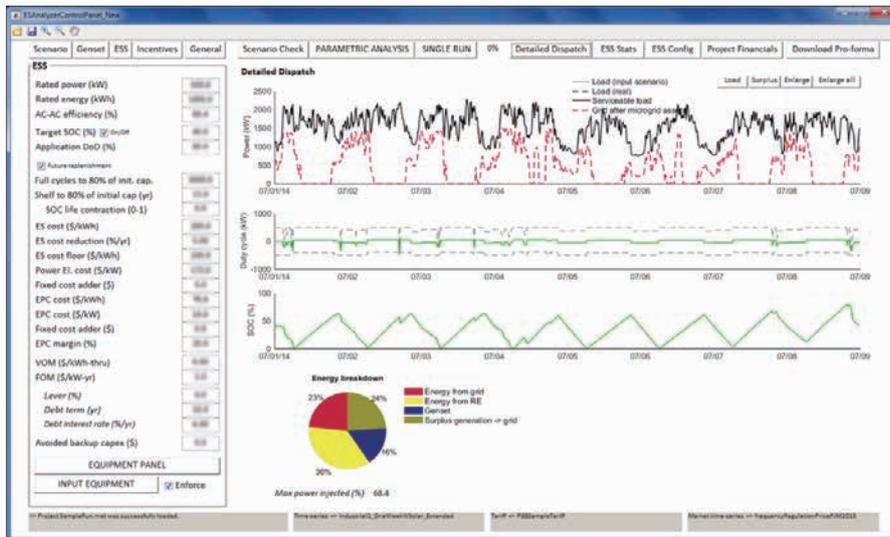
第4図に ES/Analyzer の入力シナリオの例を示す。シナリオを読み込むと、直ちに第5図の右側に示す負荷および再生可能エネルギー発電量のグラフが更新される。

(3) シミュレーション実行

エネルギー貯蔵システムの構成（出力および容

Date	Load (kW)	RE (kW)	Energy Co	PDP (\$/kWh)	Grid Limit	Peak	MidPeak	MDP (\$/kWh Billing Month)
7/1/14 0:00	1092.96	0	0.07455	0	100000	0	0	11.34
7/1/14 0:15	1113.12	0	0.07455	0	100000	0	0	11.34
7/1/14 0:30	1139.04	0	0.07455	0	100000	0	0	11.34
7/1/14 0:45	961.9199	0	0.07455	0	100000	0	0	11.34
7/1/14 1:00	862.5598	0	0.07455	0	100000	0	0	11.34
7/1/14 1:15	931.6799	0	0.07455	0	100000	0	0	11.34
7/1/14 1:30	1085.76	0	0.07455	0	100000	0	0	11.34
7/1/14 1:45	1039.68	0	0.07455	0	100000	0	0	11.34
7/1/14 2:00	1117.44	0	0.07455	0	100000	0	0	11.34
7/1/14 2:15	1067.04	0	0.07455	0	100000	0	0	11.34
7/1/14 2:30	1369.44	0	0.07455	0	100000	0	0	11.34
7/1/14 2:45	1729.44	0	0.07455	0	100000	0	0	11.34
7/1/14 3:00	2079.36	0	0.07455	0	100000	0	0	11.34
7/1/14 3:15	2089.44	0	0.07455	0	100000	0	0	11.34
7/1/14 3:30	2004.48	0	0.07455	0	100000	0	0	11.34
7/1/14 3:45	1869.12	0	0.07455	0	100000	0	0	11.34
7/1/14 4:00	1984.32	0	0.07455	0	100000	0	0	11.34

第4図 ES/Analyzer の入力シナリオの例
Fig. 4 An example input scenario of ES/Analyzer



(注) SOC : State of Charge (充電状態)

第 5 図 ES/Analyzer シミュレーション結果の例 (負荷, 受電電力, エネルギー貯蔵システムの充放電電力, SOC, エネルギー消費内訳)
 Fig. 5 An example simulation result of ES/Analyzer (Load, Purchased power, Charge/Discharge power of ESS, SOC, Energy breakdown)

量) が所与のグリッドを対象として経済性を評価する場合, エネルギー貯蔵システムの出力と容量をパネルで指定し, 「 SINGLE RUN 」 ボタンを押してシミュレーションを実行する. シミュレーションに要する時間は, ① シナリオの長さ ② 時間分解能 ③ 最適化計算の収束判定条件, などに依存するが, 時間分解能 15 分で 1 年分のシミュレーションの場合, 比較的高速な PC を使用して数分程度である.

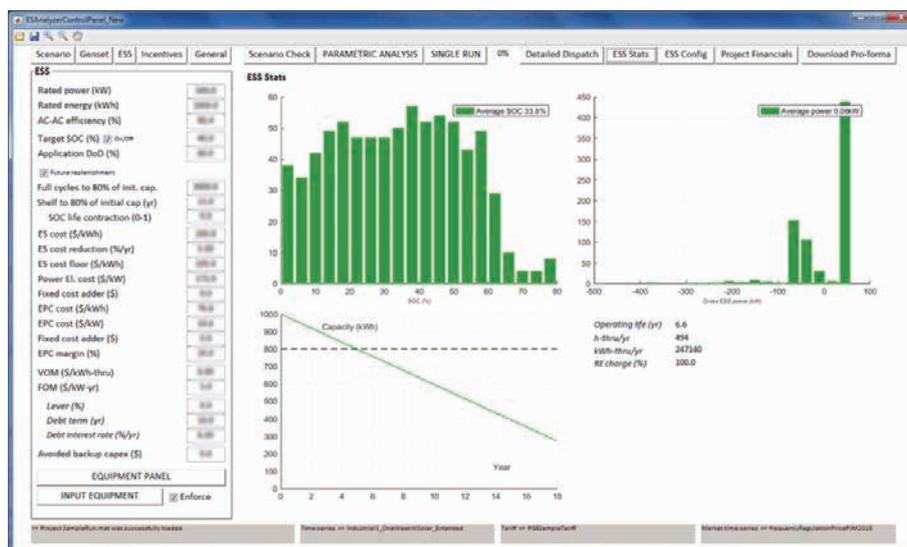
エネルギー貯蔵システムの最適な構成が未知である場合, ユーザインタフェースの上部にあるボタン「 PARAMETRIC ANALYSIS 」を押すことで起動するパラメトリック分析ツールを利用することができ

る. 本ツールでは, さまざまな構成のエネルギー貯蔵システムに対して上述したのと同じシミュレーションを行い, 蓄電池の構成と利益率および正味現在価値 (NPV) の関係を可視化する. この結果から, ユーザは最も収益性の良いエネルギー貯蔵システムの構成を見いだすことができる.

(4) シミュレーション結果の出力

エネルギー貯蔵システムの構成が, 所与のグリッドを対象として経済性を評価する場合の ES/Analyzer によるシミュレーション結果の出力例を次に示す.

第 5 図に負荷, 受電電力, エネルギー貯蔵システムの充放電電力, SOC, エネルギー消費内訳を, 第 6 図

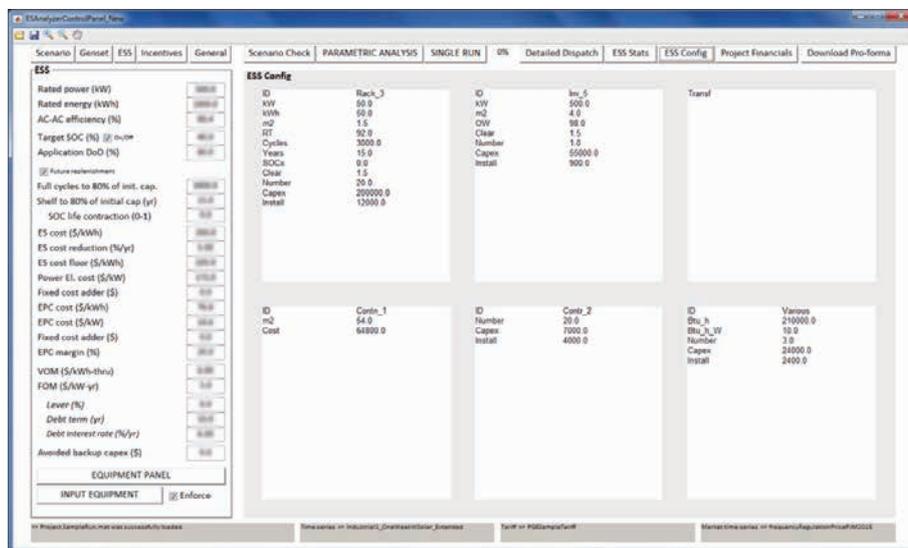


第 6 図 ES/Analyzer シミュレーション結果の例 (統計情報)
 Fig. 6 An example simulation result of ES/Analyzer (Statistics information)

に統計情報、第7図にエネルギー貯蔵システムの構成、第8図に経済性評価結果を示す。それぞれのグラフはズームイン、ズームアウトが可能であり、細部の詳細な傾向を確認できる。また、より詳細な数値を表計算ソフトウェアのレポートとして出力することも可能である。なお、経済性評価に際しては、入力シナリオは1年全体にわたる傾向を代表していると仮定し、入力データの期間によらず、経済性評価結果は年間に換算される。

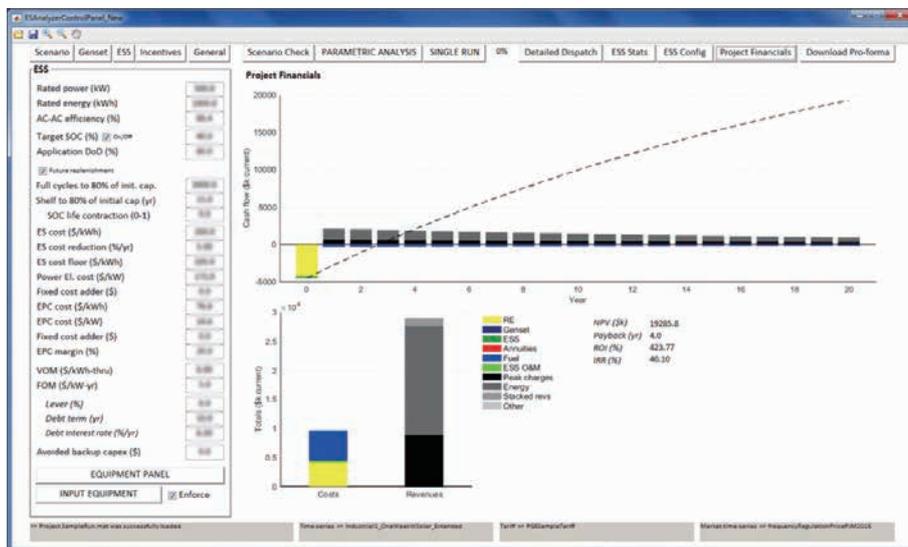
第9図に、受電電力ピークを平準化した場合のエネルギー貯蔵システム充電計画の一例を示す。一定期間内（たとえば月間、年間）の最大受電電力に応じて定まる基本電力料金を低減するためにES/

Analyzer を用いてエネルギー貯蔵システムの充放電計画最適化を行った結果、受電電力のピークが平準化された計画が得られている。基本的にエネルギー貯蔵システムへの充電は、電力量料金の高い昼間を避け、電力量料金の安い夜間帯に行うが、より大きな平準化効果が得られる場合は昼間に充電を行う場合もある。なお、基本電力料金は上述のとおり一定期間内の最大受電電力に応じて定まることから、消費電力が一定期間内過去の最大充電電力より低い時間帯においては、充放電によるピークシフトは基本電力料金の低減に寄与しない。ES/Analyzer の最適化では、このような時間帯において、不要な充放電を避けた計画が得られる。第9図において、2日目の



第7図 ES/Analyzer シミュレーション結果の例（エネルギー貯蔵システム構成）

Fig. 7 An example simulation result of ES/Analyzer (ESS configuration)



第8図 ES/Analyzer シミュレーション結果の例（経済性）

Fig. 8 An example simulation result of ES/Analyzer (Financial performance)



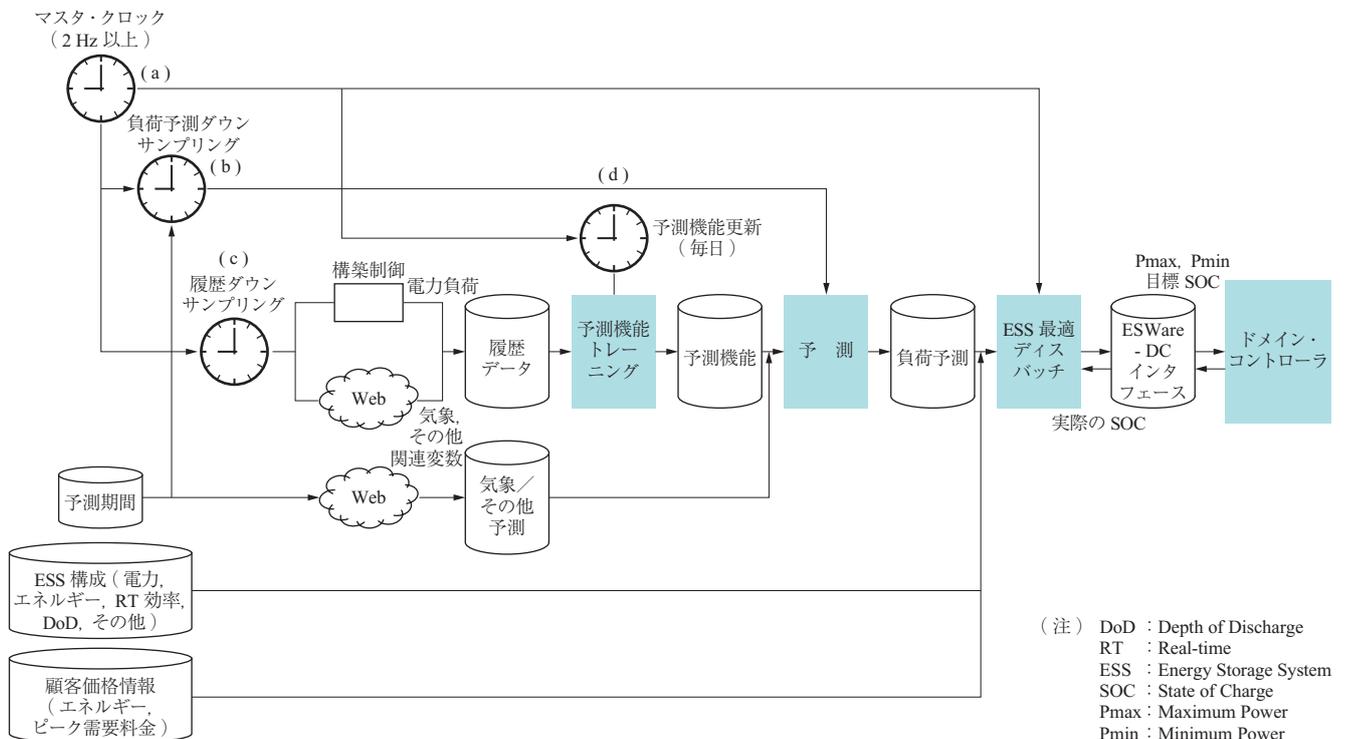
第 9 図 ES/Analyzer シミュレーション結果の例（受電電力ピークを平準化した場合のエネルギー貯蔵システムの充放電計画の一例）
 Fig. 9 An example simulation result of ES/Analyzer (An example of charge/Discharge plan of ESS for peak-shift)

充放電が少ないのはこうした性質を反映したものである。

4.2 ES/Optimizer

ES/Optimizer は、リアルタイム制御環境下で ES/Analyzer と同じ最適化の枠組みでエネルギー貯蔵システムの最適化運用計画を導くソフトウェアであり、ES/Optimizer を使用することで、エネルギー貯蔵システムの実際の運用における経済性を、ES/Analyzer で見積もった経済性に近づけることができる。

ES/Optimizer は、Simulink® で構築されている。第 10 図に、ES/Optimizer の Simulink ブロック図を示す。ES/Optimizer では、ES/Analyzer と同様、電力需要や再生可能エネルギー予測発電量などの予測に基づいてエネルギー貯蔵システムの運用計画を最適化する。ただし、リアルタイムの制御では、これらには予実差が生じるため、エネルギー貯蔵システムの運用の経済性は最適化によって見積もったものと異なる可能性がある。そこで、ES/Optimizer は予測にニューラルネットワークを用い、予実差を反映し



第 10 図 ES/Optimizer の Simulink ブロック図
 Fig. 10 Simulink block diagram of ES/Optimizer

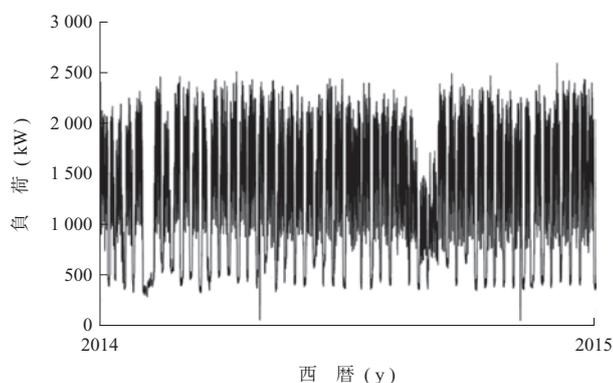
て予測モデルの学習・予測の修正を行うほか、エネルギー貯蔵電力需要を直接駆動するフィードフォワード補正や、意図した SOC の変化からの差異に基づくフィードバック制御など、予実差に確実に対処する機能を備えている。

5. 適用例

5.1 ES/Analyzer を用いたピークシフトのための蓄電池構成最適化

ES/Analyzer の適用例の一つとして、カリフォルニア州（アメリカ）北部にある産業施設を対象としたピークシフトのための蓄電池構成最適化について取り上げる。この顧客は高額の基本電力料金を課されており、エネルギー貯蔵システムを設置し、ピークシフトの適用によって基本料金を削減することを検討していた。

第 11 図に顧客の ES/Analyzer 適用対象産業施設にお

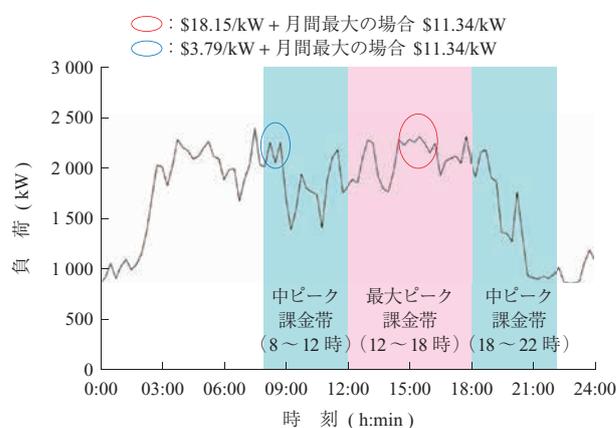


第 11 図 ES/Analyzer 適用対象産業施設における年間負荷プロフィール

Fig. 11 Yearly load profile of the target industrial customer

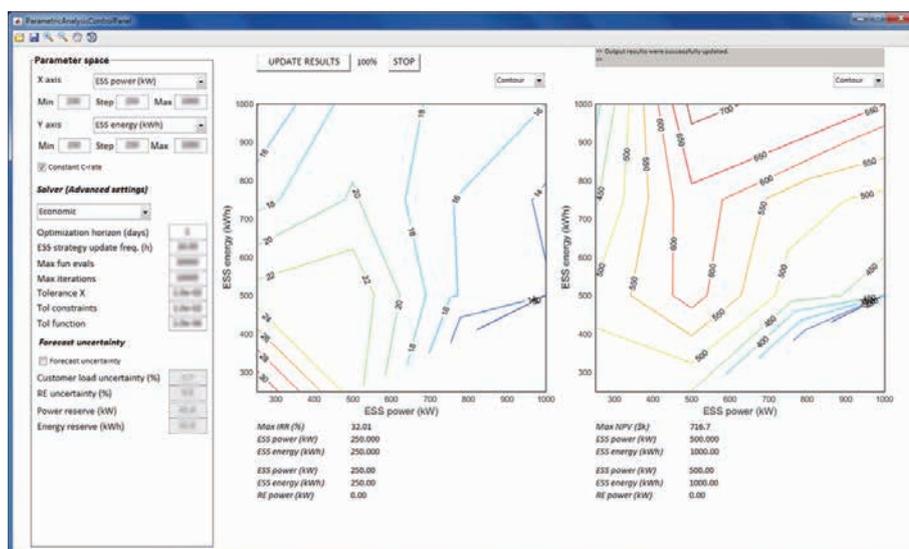
ける年間負荷プロフィールを示す。第 12 図にはそのうち 9 月のある 1 日の負荷プロフィールおよび基本電力料金を示す。夏季期間中、この顧客は最大ピーク時間帯に kW 当たり \$18.15、最大中規模ピーク時間帯に kW 当たり \$3.79、および、最大月間出力に対して kW 当たり追加で \$11.34 を支払っている。これらの料金を合計すると、毎年大きな運用経費となる。

この課題に対して、パラメトリック分析ツールで NPV を最大化するエネルギー貯蔵システムの構成を求めた結果、出力 500 kW、容量 1 000 kWh の構成が最適となった。第 13 図にパラメトリックツール分析結果を示す。この構成のもとで、「SINGLE RUN」で最適構成のエネルギー貯蔵システムを導入した場合の経済性シミュレーション



第 12 図 ES/Analyzer 適用対象産業施設における 1 日の負荷プロフィールおよび基本電力料金

Fig. 12 Daily load profile and electricity tariff of the target industrial customer



第 13 図 パラメトリックツール分析結果
Fig. 13 Parametric simulation result

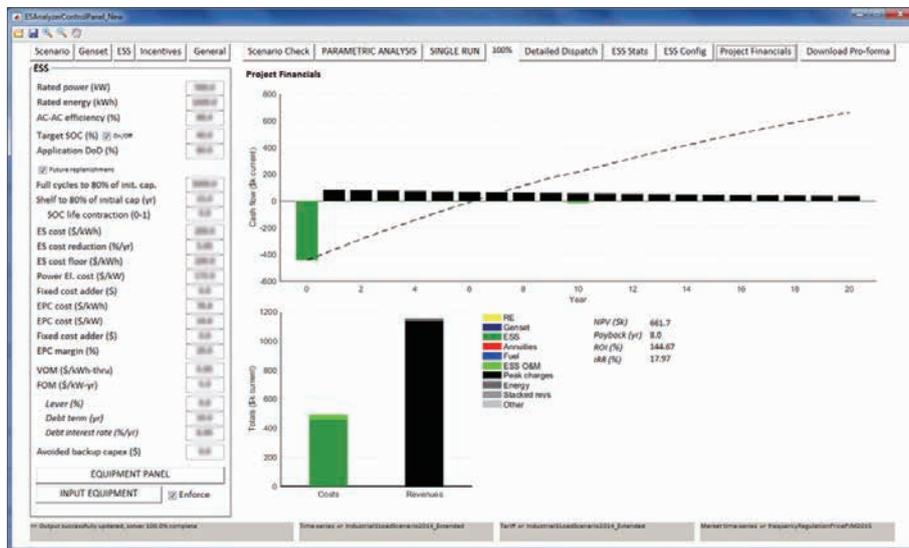
ンを行った結果を第 14 図に示す。

また、同じ構成に対して、さらに SGIP (Smart Grid Interoperability Panel) の補助金を想定した場合の経済性シミュレーション結果を第 15 図に示す。これらの図から、SGIP の補助金がない場合でも 6 年、SGIP の補助金がある場合はわずか 4 年で初期投資額を回収できることが分かる。

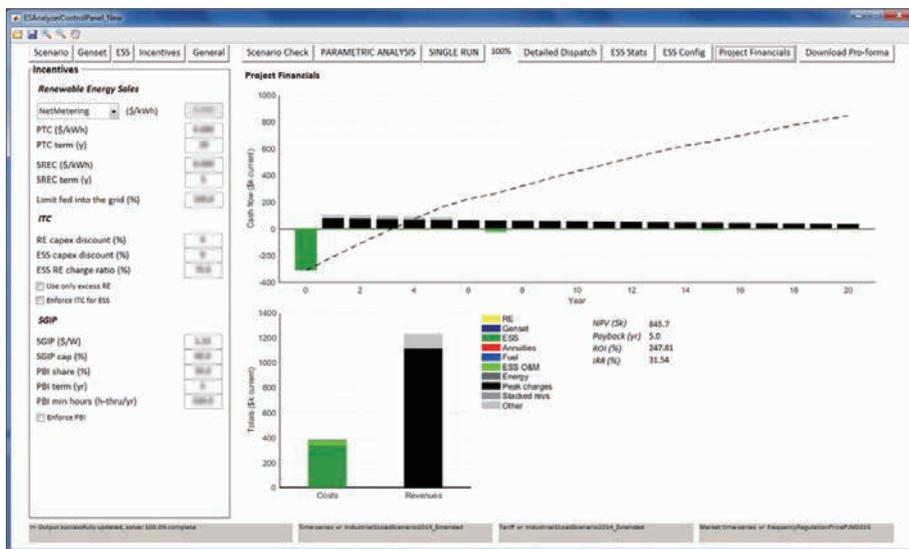
5.2 ES/Optimizer を用いたピークシフト試験

ES/Optimizer を用いたリアルタイムでのエネルギー貯蔵システムのピークシフト制御に関して、ミズーリ州 (アメリカ) 北東部の水供給会社にある IHI エネルギー

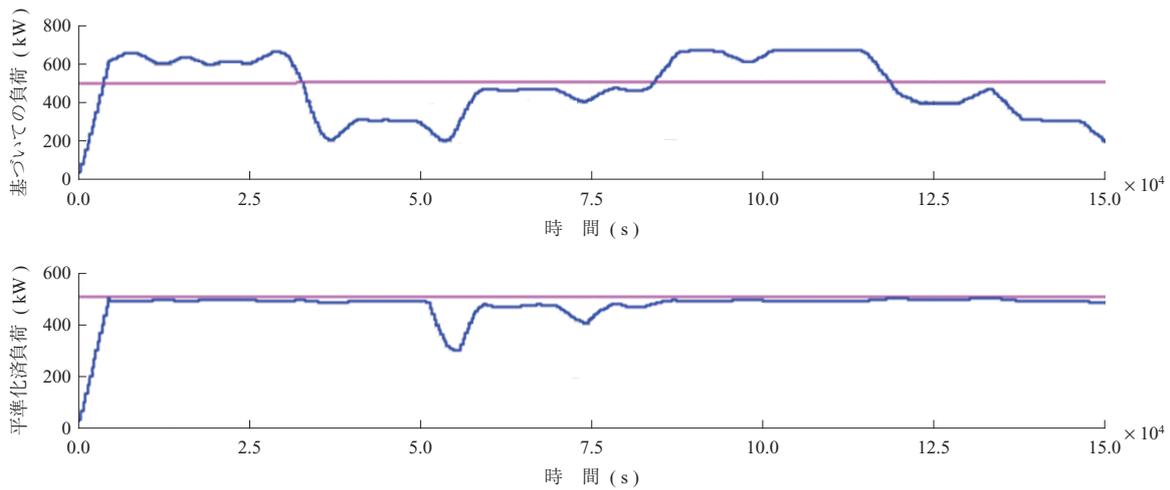
貯蔵パイロット・プロジェクトにおいて試験を実施した。用いたエネルギー貯蔵システムは、定格出力 500 kW、容量 500 kWh の 1 台の ES-500 である。第 16 図に ES/Optimizer を用いたピークシフト試験結果の抜粋を示す。第 16 図上と下の青線はそれぞれ予測消費電力、充放電計画最適化結果に基づき制御した結果の受電電力の推移を示しており、各図におけるピンクの系列は最適化計算で求められたピークシフトレベルである。第 16 図下に示すとおり、ES/Optimizer による充放電計画最適化を受けた制御を行うことで、受電電力を当該ピークシフトレベル以下に抑制できていることが分かる。



第 14 図 産業施設に対する ES/Analyzer 適用対象結果 (最適構成のエネルギー貯蔵システムを導入した場合の経済性)
 Fig. 14 Simulation result of ES/Analyzer for the target industrial customer (Financial performance under the optimal ESS configuration)



第 15 図 産業施設に対する ES/Analyzer 適用対象結果 (最適構成のエネルギー貯蔵システムを導入し、SGIP 補助金適用を想定した場合の経済性)
 Fig. 15 Simulation result of ES/Analyzer for the target industrial customer (Financial performance under the optimal ESS configuration and SGIP incentives)



第 16 図 ES/Optimizer を用いたピークシフト試験結果
 Fig. 16 Peak-shift experimental result of ES/Optimizer

6. 結 言

エネルギー業界の将来のビジネスモデルは、再生可能エネルギーや負荷、分散電源を統合した柔軟な運用に向けて進化していく必要がある。そのなかでエネルギー貯蔵システムは極めて重要な役割を担うこととなるが、構成と運用が最適になっていないと収益性が大幅に損なわれる可能性があり、アメリカの電力事業者、独立系統運用機関、独立系発電事業者は、エネルギー貯蔵システムの構成と運用の最適化に多大な時間と労力を費やしている。

ESWare はこの問題を解決するソフトウェア・プラットフォームであり、エネルギー貯蔵システムの最適な構成・運用を導くことができ、ユーザは上述の最適化検討に要する時間を大幅に節約することができる。

ESWare の最大の特徴は、エネルギー貯蔵システムの構

成・運用を同じ最適化モデルおよびソフトウェア・プラットフォームのもとで統一的に扱っている点にある。このことにより、構成最適化で見積もった経済性を実際の運用においても近いレベルで達成できるほか、エネルギー貯蔵システムの構成から運用へのシームレスな移行が可能となる。

参 考 文 献

- (1) (オンライン入手先) < <http://www.economist.com/news/briefing/21587782-europes-electricity-providers-face-existential-threat-how-lose-half-trillion-euros> > (参照 2016-07-29)
- (2) (オンライン入手先) < <http://www.greentechmedia.com/articles/read/wall-street-firms-keep-warning-of-distributed-energy-threat> > (参照 2016-07-29)