



脱炭素社会の実現に向けたエネルギー管理システム (sEMSA)

Energy Management System, sEMSA, to Realize Carbon Neutral Society

三好 秀和*
Hidekazu Miyoshi

石垣 圭久
Yoshihisa Ishigaki

尾崎 智也
Tomoya Ozaki

木村 恵敬
Yoshitaka Kimura

辻本 辰也
Tatsuya Tsujimoto

脱炭素社会の実現に向け、欧米先進諸国や日本では化石燃料を中心としたエネルギー構成から太陽光発電などの再生可能エネルギーを主力とした構成に組み換えが行われようとしている。しかし再生可能エネルギーは天候の影響で出力が変動するため安定した電力を供給することが難しいという課題がある。この課題解決の一つとして、再生可能エネルギーの出力変動を平準化するために需要家側に中小規模太陽光発電装置や蓄電池などの分散型電源を導入する取り組みが進められている。将来再生可能エネルギーが大量導入されていく中で、エリア内に分散配置された電源を統合し、安定的にかつ効率よく運用するエネルギー管理システムが重要な役割を担うことになる。本稿では、分散配置された電源を有機的に結び付け統合的に制御する自律分散+階層型の次世代エネルギー管理システムについて論じる。まず、分散電源を統合管理することの技術的な課題について述べ、次にその解決に向けた先行技術動向を整理する。最後に当社エネルギー管理システム「sEMSA-μGrid」について、その特徴と適用領域について説明する。

In an effort to create a decarbonized society, Japan, Europe, and the United States are shifting their main energy sources from fossil fuels to renewable energy sources such as solar power. However, the output of renewable energy sources fluctuates depending on weather conditions, making it difficult to provide a stable supply of electricity. As a solution to this problem, efforts are being made to introduce distributed power sources such as small- and medium-scale solar power generators and storage batteries on the consumer side to level out the output fluctuations of renewable energy. As renewable energies are introduced in large quantities in the future, energy management systems will play an important role in integrating distributed power sources and operating them stably and efficiently. This paper discusses a next-generation energy management system that organically links distributed power sources and controls them in an integrated manner. First, we will discuss the technical challenges of integrated management of distributed power sources, and then summarize the prior technological trends toward the solution of these challenges. Finally, the features and application areas of our energy management system “sEMSA-μGrid” are explained.

キーワード：再生可能エネルギー、自律分散、需要予測・発電予測、VPP、マイクログリッド

1. 緒言

再生可能エネルギーの主力電源化に加えて、脱炭素社会に向け太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー発電所が新設されるとともに、需要家側への再生可能エネルギー設備の導入が進んでいる。電力システムは従来の大規模電源を前提とした集中型から、需要家側に分散配置された太陽光発電や蓄電池などの分散型電源を前提とした分散型への変化が進んでいる。2000年代初頭、日本において数百であった発電所の数は、2021年には4千か所を超えており、今後、制度改革等により中小規模の分散型電源の導入が更に進むことにより、将来的には数百万にもおよぶ分散型電源の安定した制御が必要となる。

このような大量の分散電源を従来型の中央集約的に制御することは、通信量や情報量の観点から難しい。このため、欧米を中心に次世代型の電力システムに関する研究が活発に行われている。例えば米国の国立再生可能エネルギー研究所では、ARPA-E (Advanced Research Project) のプロジェクトにおいて自律分散型+階層型の電力システムに関する研究開発がなされている。本研究によると、この

コンセプトが実現した場合、米国において4.9GWの供給予備力、毎年33億ドルの価値を生み出す。その実現に向けて、予測、最適化計画、制御の3段階に分けたモデルが提唱されている^{(1),(2)}。



図1 当社グループの事業とSDGsの関わり

当社では、次世代型電力システムに向けた研究開発を行ってきており、その成果の一つとして2021年6月にsEMSA- μ Gridとしてプレスリリースを行った⁽³⁾。また、本研究開発は環境に優しい社会の実現を目指すものであり、当社グループのSDGsへの取り組みにも貢献する(図1)。本稿では、次世代型の電力システムの課題について整理し、次にsEMSA- μ Gridの要素技術である、予測技術、最適化技術、制御技術について説明するとともに、今後の研究課題について議論を進める。

2. 次世代の電力システムの課題

次世代の電力システムとして、階層型のアーキテクチャに関する研究が活発に行われている。日本においてはVPP (Virtual Power Plant) を実現するアーキテクチャとして、需要家に設置される分散型リソースを束ねるリソースアグリゲータ、その上位で更にリソースアグリゲータを束ねるアグリゲーションコーディネータといった階層型のアーキテクチャが提唱されている⁽⁴⁾。

このアーキテクチャでは各階層において役割分担されており、例えば需要家の層では需要家に設置される分散電源を制御し、受電点を基準とした制御目標値に正確に一致する制御を行うことが期待される。またその1つ上の層では複数の需要家を束ね、それら需要家の受電点の総和が計画値に一致するように制御を行うことが期待される。このコンセプトを階層化計画受電と呼び図2に示す。以降、受電点を制御目標値に正確に一致させるよう制御することが非常に難しいことを実例で説明する。

図3はある国内特高需要家の3か月分の受電電力について

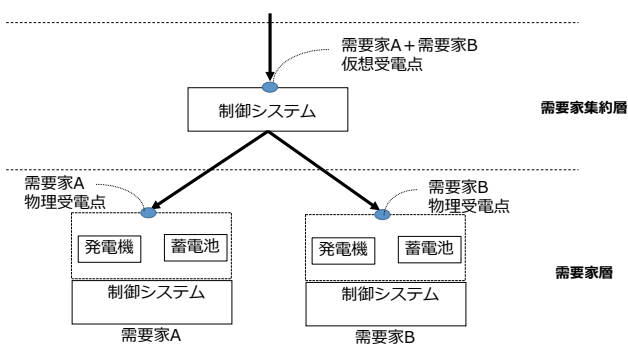


図2 階層化計画受電のコンセプト

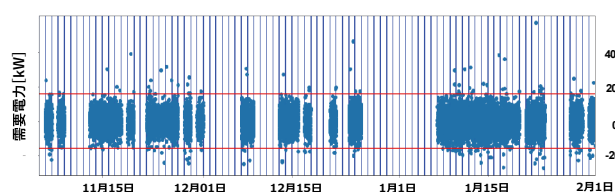


図3 受電電力の短期的な変動の様子

短期的な変動(1分差分)を調査したものである。本需要家の契約電力は約1万kW、1分周期で需要データを取得しその差分をとったところ平均的には51.4kW (0.514%)であるが、時として200kW (2%)を超える短期的な変動がガウスノイズのように存在することが窺える。

このような短期的な変動への対応として一般に30分平均を対象とする需要や発電の予測技術が重要であるが、1分や秒オーダーの制御においては予測技術だけに頼るのではなく、予測を活用しつつも短期的な変動に対応できる細かい周期の制御の併用が重要と考える。

次に、需要家を束ねる仮想受電点の制御について論じる。階層型アーキテクチャの各ノードに存在する制御システムは、各々が協調して動作する必要がある。この課題として各メーカーの制御システムはメーカー独自の実装上の制御の傾向や特性があり、それが需要家を束ねた際に制御誤差の要因になりえることである。当社では経済産業省のVPP実証等を通じて他社の制御システムとの接続実績が蓄積されており、複数社から構成されるシステムを実現するうえでの技術課題を分析している。一つの課題として当社システムから他社システムへの制御指示とそれに対する応答(制御実績)との関係性に関して、制御実績が上振れする傾向、もしくは下振れする傾向のあることが分ってきた。例えば、図4は、ある2つの需要家の制御システムに対して同需要家を束ねた制御システムから発した制御指令値と計測された実績値の差分に対してスミルノフ・グラブス検定^{*1}を行い、得られた正規分布である。指令値と実績値が同じ場合はゼロ、実績値が下振れした場合は正值、上振れした場合は負値で表現している。この例では誤差としては上振れする場合も下振れする場合も存在しているが、平均的には上振れしている。誤差の要因や特性は様々あるが、メーカーによる実装の傾向があると考えている。

別の課題としてリソースの応動時間の問題がある。例えば制御対象が発電機の場合、制御指令を発行してから所望の出力に達するまでにある程度の時間が必要であり、制御システムが保持するリソースの種類によっては制御に対する応動時間の考慮が必要となる。

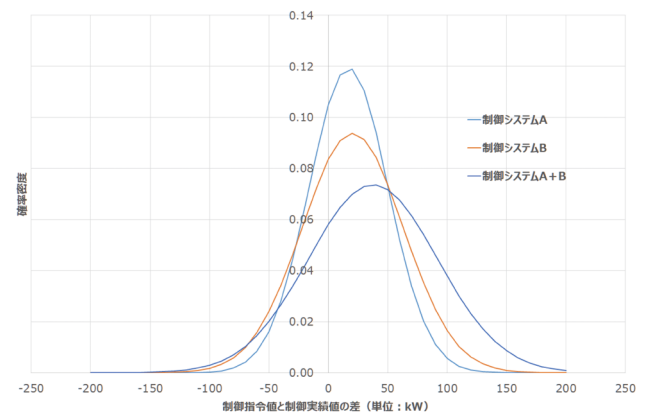


図4 制御誤差の確立密度関数(検定後)

さらに制御システム間で発出される制御指令値が、需要家層における制御対象である発電機の出力や蓄電池での充放電量を超えた指令となっているケースがあり得る。また、上位層の制御システムほど制御対象とする時間粒度は荒いために、粒度境界前後においては制御指令値の差分が大きい場合が生じる。この大きな指令の変化に対して、需要家層の発電機の応動時間や蓄電池の充電状態によっては追従できない場合がある。つまりある制御システムから別の制御システムに制御指令を発する場合、別の制御システムの制御リソースの特性や状態を把握し随時適応させないと、制御誤差が生じる可能性がある。

以上述べてきたように、階層型の制御システムの実現に向けては、複数の制御システム間での協調動作が重要であり、そのためには制御システムが持つ独自の制御の傾向や、制御対象となる発電機や蓄電池などリソースの特性に応じて柔軟に制御を適応させることが重要となる。次章ではこの実現に向け鍵となる、予測技術、最適化技術、フィードバック制御技術について議論を進める。

3. 関連技術と sEMSA による技術

3-1 需要予測技術

需要予測の対象は様々であり、何千や何万の需要家を対象とした広範囲でのエリア需要を予測することや、インバランス回避や自己託送といった用途に向けた需要家単位の予測などがある。一般的な需要の予測モデルは、下記に示すような需要データの特徴を捉えることにより将来の需要を予測する。

- ・周期性：周期性のアイディアは、例えば月曜日の需要は前週の月曜日、更に前々週の月曜日と似ている、また一日の需要のなかで、ある日の朝9時から9時30分の需要は、前日の同時間帯の需要と似ているとの想定に基づく。
- ・連続性：例えば9時から9時30分の需要量は、9時30分から10時のものと近いという想定に基づく。
- ・相関性：例えば需要は気象と相関があるというものであり、夏の暑い日のある日中の需要は別の暑い日の日中の需要と近いという想定である。

図5は周期性に注目した需要データの分析方法のイメージである。1日分のデータを時間毎に24個に分類、数か月にわたり同一時間帯のデータを集約しその確率密度関数を分析したものである。時間帯によって、平均、分散、ピークの数などパターンが異なることがわかる。

需要予測のモデルとしては、移動平均モデル、自己回帰モデル、自己回帰移動平均モデル、機械学習や人工知能を活用したサポートベクターマシンやニューラルネットワークの応用などが提唱されている。例えば、時間帯別平均化手法はデマンドレスポンスのベースラインとしても利用されている。計算方法は非常にシンプルで、各時限の直近N日分の計測値の平均値を予測値として使用する方法である。

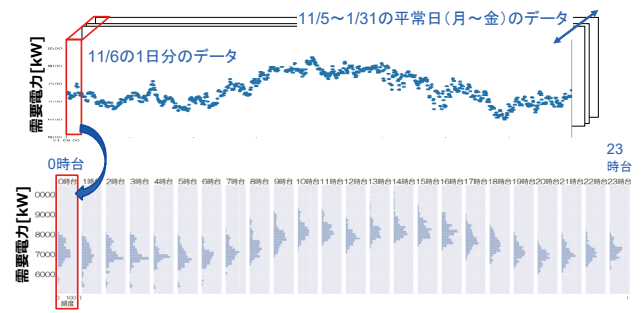


図5 需要予測に向けた需要データの分析

また、自己回帰モデルは自らの過去の値で将来の挙動を説明するというモデルである。多変量自己回帰モデルは、予測対象をそれ自身と他の複数の変量の時系列で表すものであり、他の変量として外気温、湿度、風速、日射量などの気象情報等が用いられる。

当社では複数の需要予測モデルの研究開発を進めており、需要家に応じて適用するモデルを選択しフレキシブルに適用モデルを変更できる機構を目指している。特に特高需要家に対しては、モデルをそのまま適用してもうまくフィットしないケースも多く、需要家の電力データを分析して、ある予測モデルに需要家特有のカスタマイズにて対応するサービスも提供している。

図3にも示した通り、拠点によって需要データは急峻に変化する場合もあり、このような場合には充放電の切り替えサイクルの早い蓄電池で需要の変化を吸収することが対策の一つである。しかしながら、設置した蓄電池の能力を超えて変化した場合には、蓄電池の入出力で吸収できない。従い需要の短期的な変化を一つの着眼点として、拠点毎に導入する蓄電池の最適な要件を推定することはシステムを設計する上で重要である。つまりデマンドの変動許容量と過去の需要の短期的な変動から、必要となる蓄電池の入出力を推定する。当社では過去の需要データを分析し、需要量を需要予測モデルで予測可能な成分と予測不可能な成分（ノイズ成分）に分離し、ノイズ成分の確立密度関数を分析することにより、最適な蓄電池容量をシミュレーションにより推定する技術の開発を行っている。

3-2 太陽光発電予測技術

太陽光発電の予測モデルとしては、気象予報情報を基にモデル化する数値予報モデル、直近の実測データを基に時系列の連続性から予測する統計的モデル、機械学習や人工知能の技術を用いるモデルなどがある^{(5),(6)}。

数値予報モデルは、大気や海洋・陸地を細かい格子に分割し、それぞれの格子の気温・風などの気象や地表温度などのデータ値を推測し、風の動きや太陽光による温度上昇や低下をあるモデルにより予測することにより、将来の気象状態を予測するものである。数週間先から数時間先の予測に用いられることが多い。

統計的モデルは太陽光発電の実測データを用いるものであり、気象データを時系列データと捉え、過去の実測データを基に数時間先までの将来の気象データ値を予測するものである。モデルとしては自己回帰モデルや自己回帰移動平均モデルなどがあり、基礎となるアイデアは需要予測と同じである。またこの亜種として Exponential Smoothing モデルがあり、過去データに重みづけを行い（直近のデータほど重みづけを大きくする）将来を予測する。この統計的モデルでは数時間先の予測に用いられることが多い。

別の手法として、機械学習や人工知能の技術を用いるものがある。最近のトレンドは、ニューラルネットワークやサポートベクターマシンを用いた手法である。この手法は太陽光発電や気象データなどの実測データを学習データとしてモデルにフィッティングさせ、将来の発電データを予測するものである。統計的モデルが短期予測に用いられるのに比べ、機械学習は短期予測から翌日予測まで比較的幅広い範囲の予測に用いられている。

当社 sEMSA では、広域機関への翌日計画の作成を目的とした数時間前から翌日一日分の中期的な予測と、ゲートクローズ前の当日計画を目的とした1時間先の短期的な予測を行っている。中期的な予測としては、数値予報モデルをベースに、太陽光パネルの傾斜角等の情報を加え、発電予測をしている。これをベースに発電拠点からの発電データをリアルタイムで収集することにより、数値予報モデルでの発電予測に補正（フィードバック補正）をかけ、より直近の発電予測を行っている。これらのモデルに加え、天候によるクラスタリングやサポートベクターマシンを応用した統計的モデルや機械学習モデルに関する研究開発を進めている。

これらモデルは一般的な予測技術であり、実用に向けてはこれらの予測モデルを一步進め、個別の発電拠点に特有の特徴を抽出するなどして、更に予測精度を高めることが重要である。例えば、ある時間帯において太陽光パネルに建物の影が覆い、その間のみ発電量が落ちること、また太陽光発電システムの故障等により、日射量と発電量との相関が通常とは異なっているといった事象である。実運用上はこういった太陽光発電システムの個々の特徴も考慮した予測が必要になる。

3-3 制御技術

sEMSA の制御機能は大別して2つあり、1つは受電点ベースで需要量が一定量を絶対に超えないように制御する機能（ピークカットや太陽光発電逆潮流防止等）、2つ目は受電点ベースで需要量が一定量と常に一致するように制御する機能である。前者はルールベース制御、後者はフィードバック制御として実現している。

ルールベース制御は需要電力がある一定量を超えないように制御するデマンド制御、太陽光発電の出力が需要量を超えて逆潮流することを防止する太陽光発電の出力制御機能などに利用する。デマンド制御はデマンドが契約電力を超えないように、需要電力が予め設定された閾値を超えた

場合に、ある負荷を落とすような制御である。例えば毎時20分と50分に契約電力を超過しそうかどうかの判断をし、超過しそうであれば負荷を落とす制御を行う。太陽光発電の出力制御機能は、例えばある拠点に設置された太陽光発電の発電量が当該拠点の需要量を超える場合、その余剰分が逆潮流として系統に流れてしまうことを防止する機能である。常時、太陽光発電の量と需要の量を監視し、逆潮流が発生する蓋然性が高い場合、太陽光発電の出力を停止もしくはは出力量を抑制する。太陽光発電の出力は急激に変動するため、秒単位での監視・制御が必要となる。

ルールベース制御では、条件とアクションで規定される。条件は「需要電力が一定電力量を超える」などであり、アクションは「ある負荷を落とす」などである。制御の課題は条件判定を行う周期と条件判定してから実際に制御を行うまでの制御遅延である。この条件判定周期や制御遅延が大きいと、余裕をみた条件判定が必要となり、例えば本来は太陽光発電の出力を停止しなくてもよいのに出力抑制をしてしまい、結果太陽光発電の利用効率が劣化することがある。

フィードバック制御では受電点がある一定の値に一致するような制御を行い、計画値同時同量や需給調整市場三次①や②への適用が可能である。一般的にPID制御（Proportional-integral-derivative controller）を応用したロジックが用いられる⁽¹²⁾。P（Proportional）制御では、直近の指令値と実測値の差分を反映する。I（Integral）制御では、過去の制御指令の蓄積を考慮する。D（Derivative）制御では、直近のトレンドから将来を予測する。PID制御を電力システムに適用する際の課題の一つは、P・I・D各制御の重みづけであり、これは連携する他の制御システムや制御対象となるリソースの特性に大きく依存するものである。

sEMSAによるルールベース制御では、制御遅延を最小限に抑えるために最短1秒周期で条件判定を行い、条件が真の場合は秒以下の遅延で制御指令を発行する。条件判定の閾値はパラメータ設定となっており、拠点毎の需要パターン、発電パターンなどの特性に合わせ最適にチューニングした値（監視周期と、周期内での需要や発電の変動幅を考慮）を設定することが可能である。

sEMSAによるフィードバック制御ではPID制御の考え方を応用している。PID制御を電力システムに適用する際の課題の一つであるP・I・D各制御の重みづけについては、システム導入に先立ち現地環境をシミュレーションすることにより初期チューニングするとともに、システム稼働後定期的にモニタリングし適宜アップデートすることで最適な値を維持する。またI制御で考慮する過去時間の範囲については適用アプリケーションによってチューニングできる機構となっている。例えば同時同量のアプリケーションだと30分を周期にデマンド時限が切り替わる。一方需給調整市場への適用では、1分もしくはは数分周期に設定する必要があり。アプリケーション毎に過去時間の範囲を切り替えられる機構を持っている。

3-4 最適化技術

sEMSAは、発電機や蓄電池を制御することにより需要のピークをシフトさせる、また購入する電気代や燃料費を含めてトータルの運用コストを最小化するための制御運用計画を立案するといった最適化制御の機能を備える。これは需要予測や発電予測に基づき、将来数十時間にわたり発電機の発動・停止タイミングや蓄電池の充放電タイミングをある指標に基づき最適化する機能である。sEMSAではこの機能を実現するために、数理計画法を採用している。混合線形計画法では目的関数（コスト最小化など）とその制約条件（発電機の最大出力など）を一次式の形で表現し、組み合わせ最適化問題として解を得る。適用事例として、米国の独立系送配電システムオペレータのMISO (Midcontinent Independent System Operator) では、送電網の容量を制約条件として需要を満たす最適な発電計画を立案する需給システムへの応用がある⁽⁷⁾。当社でも2013年より本格的に大規模工場やVPPへの応用を目指し最適化計画の研究開発を進めてきており一定の成果が得られている^{(8),(9)}。

sEMSAの特徴の1つとして、1つもしくは複数の最適化ソルバー^{(10),(11)}を組み合わせ、最小の時間で最適解もしくは疑似最適解を得るアーキテクチャを備えている。sEMSAが対象とする数理最適化問題の多くは、単純なモデル化とソルバーの適用だけではNP困難問題^{*2}となるが、発電機や蓄電池の定式化に際して実際の設備の動作仕様を維持しつつも現実時間で解が得られるような抽象化と、ソルバーの特性を考慮したモデリングを行うことで解決している。

モデル式の具体例として、出力範囲や効率、起動や停止のランプアップ時間、出力の変化時間などは設定できるようにパラメータとしており、これらの設定値は設備固有の値としてチューニングをかけている。また2章で述べたように、階層化アーキテクチャでは複数ベンダとの制御システム間の相互接続が必要となり、制御システム独特の制御の傾向や制御対象リソース特有の応動時間などの特性の考慮が必要となる。sEMSAではこのような他社制御システムを含めてモデル化しており、高精度な制御を実現している。

4. sEMSA-μGrid

当社は前章で述べてきた要素技術を精巧に集積し、階層化計画受電を実現するシステムを開発した。図6は経済産業省・VPP実証事業における需給調整市場三次②実証での制御結果例である。2つの拠点とそれ等拠点をアグリゲートしている。DR期間である4時間にわたり、ほぼ計画値と実績値が一致しており、2章で述べた階層化計画受電が実現できている。

当社は以上述べてきた機能をコア技術としてパッケージ化しsEMSA-μGridとして、2021年6月24日にプレスリリースを行った。図7にsEMSA-μGridのシステム構成例を示す。パッケージとしては、①VPPパッケージ、②脱炭素

化パッケージ、③マイクログリッドパッケージから構成される。VPPパッケージは電源^{1*}※³や需給調整市場に対応しており、既に電力小売事業者数社への導入実績がある。脱炭素化パッケージは、脱炭素化を目指す工場や店舗施設向けであり、再エネ自家消費最大化やピークカットによる最適計画機能を持つ。マイクログリッドパッケージは自治体や地域新電力向けのものであり、役所庁舎や公民館といった自治体所有施設などの複数施設の統合監視・制御や、ある拠点に導入した太陽光発電の余剰電力を別の拠点に託送する機能などを含む。

sEMSAは次世代電力システムアーキテクチャである階層化モデルを視野に設計している。階層化モデルでは自立分散型のノードが多階層になっており、最下位層のノードが分散電源に対して直接的に制御を行い、それより上位層のノードは複数の下位層のノード群を集約する。階層間のノード間では、計測情報、調整可能情報、制御指令情報を交換する。このインターフェースは基本的にどのレイヤでも同じであり、階層を増やすことによりスケラビリティをもたらすことができる。

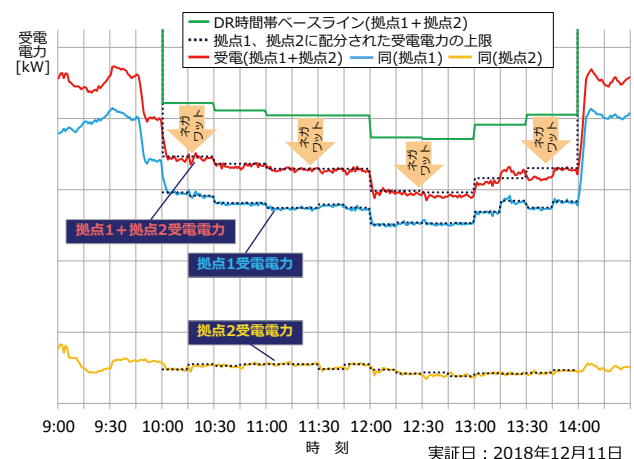


図6 sEMSAによる階層化計画受電点制御

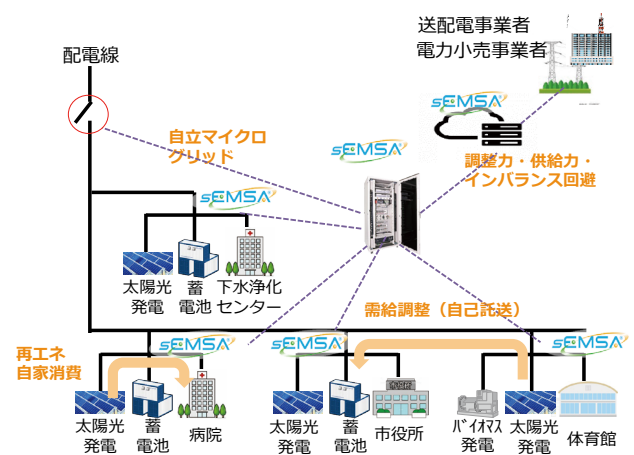


図7 sEMSA-μGridのシステム構成例⁽³⁾

5. 結 言

本稿では次世代の電力システムとして求められるアーキテクチャとそれを実現するための最新の技術動向、および当社 sEMSA の技術ポイントについて述べた。脱炭素化や持続可能な社会の実現に向けた流れは世界的な潮流であり、この実現にむけ国内外で新しいコンセプトの電力システムに関する研究開発が活発に行われており、当社も sEMSA 技術を一つの切り口として、社会に貢献していきたい。

用語集

※1 スミルノフ・グラブス検定

データの母集団が正規分布に従う際に、極端に大きい値もしくは小さい値が異常値か否かを検定すること。

※2 NP 困難問題

問題規模が大きくなると爆発的に計算時間が増え、解を得るのが非常に困難な問題。

※3 電源 I^{*}

調整力の一つのメニューであり、猛暑や厳冬などの厳気象時の需要急増に対応する。

* sEMSA は住友電気工業㈱の登録商標です。

参 考 文 献

- (1) Final Report for ARPA-E NODES, "Real-Time Optimization and Control of Next-Generation Distribution Infrastructure" Project, Andrey Bernstein, National Renewable Energy Laboratory
- (2) Tomorrow's Power grid Will Be Autonomous, IEEE Spectrum magazine
- (3) 住友電工プレスリリース、「地域マイクログリッド向け sEMSA[®] (Sumitomo Energy Management System Architecture) の販売開始」
<https://sei.co.jp/company/press/2021/06/prs056.html>
- (4) 経済産業省・資源エネルギー庁、「VPP・DRとは」
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/advanced_systems/vpp_dr/about.html
- (5) Solar Power Forecasting, Zheng Wang, PhD Thesis, University of Sydney (September 2019)
- (6) 大関崇、「太陽光発電の発電予測技術概要」、独立行政法人産業技術総合研究所太陽光発電工学研究センター
- (7) HIPPO - Solving large Security Constrained Unit Commitment Problem, FERC Technical Conference (June 23, 2020)
- (8) 堀広生 他、「需要家エネルギーを最適化する sEMSA」、SEI テクニカルレビュー第187号 (2015年7月)
- (9) 田村潤平 他、「クラウド型サーバによる分散型エネルギーリソースの最適制御」、SEI テクニカルレビュー第195号 (2019年7月)
- (10) Gurobi Optimizer, <https://www.gurobi.com/>
- (11) CBC (Coin-or branch and cut), <https://github.com/coin-or/Cbc>
- (12) K. J. Ångström and T. Hagglund, PID Controller 2nd Edition, Instrument Society of America

執 筆 者

三好 秀和* : パワーシステム研究開発センター
部長



石垣 圭久 : パワーシステム研究開発センター
主席



尾崎 智也 : パワーシステム研究開発センター



木村 恵敬 : パワーシステム研究開発センター
主査



辻本 辰也 : パワーシステム研究開発センター
主幹



* 主執筆者