

カーボンニュートラルが求める電力システムと分散リソースへの期待

—VPPの歩み・到達点・展望—

石井 英雄*・林 泰 弘**

*,** 早稲田大学 東京都新宿区早稲田鶴巻町 513

*,** Waseda University, 513 Wasedatsurumakicho, Shinjuku-ku, Tokyo, Japan

* E-mail: hideishii@aoni.waseda.jp

キーワード：カーボンニュートラル (Carbon Neutral), 分散エネルギーリソース (Distributed Energy Resource), VPP (Virtual Power Plant).

JL 0001/24/6301-0004 ©2024 SICE

1. まえがき

本稿では、カーボンニュートラル達成に向け再生可能エネルギーの主力電源化を目指す電力システムにまつわる論点を概観するとともに、諸課題解決の旗手と目されるバーチャルパワープラント (Virtual Power Plant: VPP) に関するわが国における取り組み、現時点での達成度合い、今後の課題・展望について述べる。VPPとは多数の、蓄電池、電気自動車、給湯機などの蓄エネルギー機器、自家用発電機やエネファームなどの創エネルギー機器、エアコン、照明、生産設備などの電力負荷といった機器群を通信網を介して統合管理し、あたかも単一の発電機のように機能させる技術を指し、エネルギーマネジメントの一形態であるといえる。

電力システムにおいては、電気の総発電量とその消費に当たる総需要量はいかなる瞬間においても一致しなければならない。気象状況や時間帯によって発電出力が変わってしまう太陽光発電や風力発電は変動性再生可能エネルギー (Variable Renewable Energy: VRE) と呼ばれ、これらが主流の電源になる状況では、電力システムの運用が難しくなっていくことが容易に想像できよう。その困難を克服するためには、電力の需要そのものや需要家が保有するエネルギー機器に協力を仰ぐ必要があり、その具現化が VPP である。すなわち、VPP は VRE の導入拡大を可能とするために不可欠な技術であり、カーボンニュートラル達成の鍵を握る。

以下の章で、カーボンニュートラルに向けて変化しつつある電力システムの特徴と課題を述べた後、VPP がどのように課題解決に貢献するのかを見ていく。およそ 10 年間の取り組みを振り返り、VPP の現在の到達点ならびに課題や展望について述べる。

2. 脱カーボンを背景とする電力システムのパラダイムシフト

近年、電力システムは大きな変革期にある。その最大の要因は、まえがきで触れたように、脱炭素に向けて

太陽光発電 (Photovoltaic Generation: PV) や風力発電といった VRE を発電の中心に据えていくことを避けずは通れない点である。出力が天候に依存し不安定な VRE を主力電源化していくためには、蓄電池をはじめとする蓄電機器、ならびに、熱や水素等への転換による蓄エネルギー技術との組合せが必要となる。CO₂ 排出の一大セクターである運輸においては、自動車を電動化する動きが広まっており、世界各地で野心的な目標が国レベルで掲げられている。つまり、これまで電気を使うだけであった需要家側に、発電・蓄電等の分散型エネルギーリソース (Distributed Energy Resource: DER) が大量に導入される世界に向かうことになる。このような需要家の変化は、コンシューマーからプロシューマー (消費だけでなくエネルギーの創出も行う) への転換といわれる。大規模な発電機で電気を作り、巨大な送配電網により一方向に電力を送ってきた電力システムに、まさにパラダイムシフトが起きている。

さらに、日本も欧米に次いで、従来の垂直統合された電気事業を、発電、送配電、小売の機能に応じて分割して別々の事業者とするとともに、2016 年に発電と小売のセクターを全面自由化した。発電された電気を、送配電網を通じて一定周波数・一定電圧のエネルギー (kWh) として需要家に届けるという点では同一であるが、発電セクターが分離されたことによって事業者間で新たな電気の価値の取引が必要になる。すなわち、電気を発電できる能力に相当する kW 価値は、小売事業者が発電事業者から調達すべきもの、また、発電と需要のミスマッチを解消し周波数を一定に保つ調整力の Δ kW 価値については、一般送配電事業者が発電事業者より調達すべきものと整理される。これら電力の 3 つの価値は、それぞれ卸電力市場 (kWh)、容量市場 (kW)、需給調整市場 (Δ kW) において取引されることとなる。今後は、プロシューマーも電力の 3 つの価値の創出者として期待され、各市場に参入することが可能となる。

ここで述べた電力システムの大転換について、図 1 に模式的に示す。

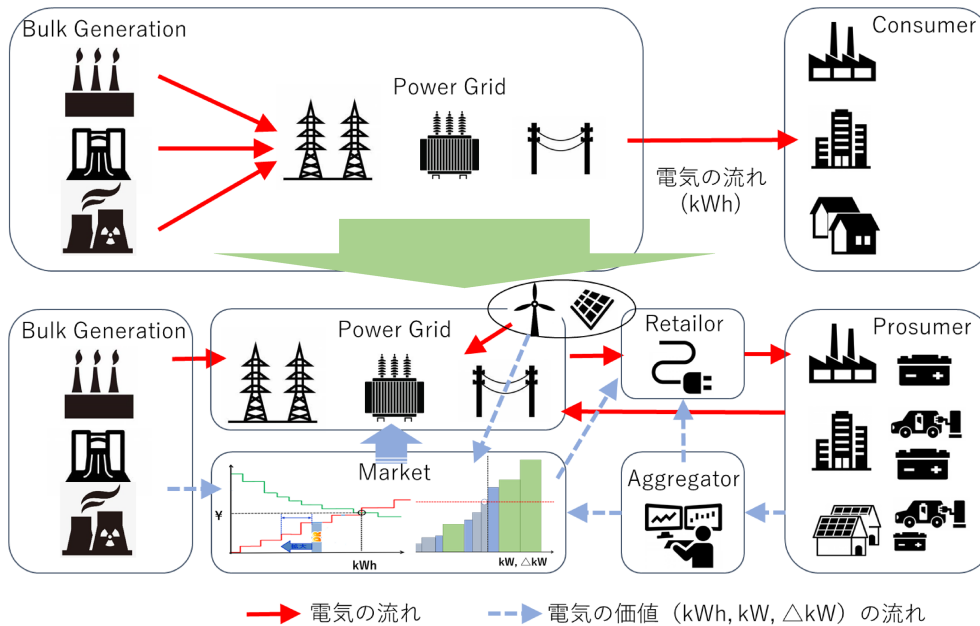


図 1 電力システムの大転換

3. バーチャルパワープラント

電力システムにおいては、総発電量と総消費量が常に一致していなければならない。従来、総消費量にあわせるように火力発電や水力発電の発電出力を変化させる運用、すなわち ΔkW を使用する制御が行われてきた。しかし、VRE が増え、火力発電機の台数が減少する今後の世界では、総発電量と総消費量のミスマッチが拡大し、これを補償するツールが減少することになる。世界エネルギー機関 (IEA) は、VRE の発電に占める割合が高まるほど、電力システムの安定な運用に必要となる“flexibility” (柔軟性) の量が増えていくことを報告している¹⁾。ここでいう flexibility は ΔkW とほぼ同義であり、発電量と消費量の差を埋めるための手段を意味する。実際、日本では、九州エリアを皮切りに東京を除く全エリアで PV の出力抑制が必要となっており、これは flexibility が必要となった一例である。今後、VRE の量をますます増大させねばならず、flexibility の必要量も拡大することになる。

今後の新たな flexibility の担い手として期待されているのが、本稿の主題であるバーチャルパワープラント (VPP) である。図 2 に VPP の概念を示す。需要家の電力消費や保有するエネルギーリソース DER は一般に小容量であり、電力システムの運用者が利用できるようにするには、多数を束ねて相互に協調させる必要がある。その役割を担うのがアグリゲータである。アグリゲータは個々の需要家が蓄電池などの蓄エネルギー機器、エネファーム等の創エネルギー機器の出力や電力消費を上げ・下げする動作の全体を指揮し、電力システムの運用に求められる ΔkW 等を生み出す“仮想的な発電

所” = バーチャルパワープラントとして機能させる。

この概念を実現するために、日本では経済産業省がエネルギーリソースアグリゲーションビジネス (ERAB) 検討会を組織し、有識者・関連事業者によって制度・ルール構築の環境整備を行うとともに、実証事業の実施によってアグリゲータの育成、技術の蓄積を進めてきた²⁾。

ERAB 検討会では、需要家単位での貢献量の計測方法、各事業者が通信に使用する標準インタフェース、確保すべきサイバーセキュリティのレベルや具体的な対応などについて詳細な検討を行い、各種ガイドラインを策定した³⁾。実証事業では、これらのガイドラインに従いつつ、需給調整市場で想定される取引要件などを採用した試験基準を設け、アグリゲータが現実の DER を束ねた VPP をどの程度試験基準を満たすように動作できるか検証が行われてきた⁴⁾。

4. VPP の到達点

4.1 調整力電源の調達と VPP の商用化

VPP は、2016 年に行われた一般送配電事業者による調整電源の調達において採用され、国内で最初の実用事例となっている。これは、一般送配電事業者が総発電量と総消費量のギャップを埋めるために必要となる ΔkW を調達するプロセスであり、需給調整市場が完全発足するまで (2024 年の予定) の仕組みである。調達はいくつかのカテゴリーに分けて行われ、VPP が採用されたのは“電源 I' (イチダッシュ)”といわれるものである。これは、通常安定供給に必要とされる調整力 (電源 I、最大 3 日平均需要の 7%) とは別に、厳気象対応の予備電源として調達される (最大 3 日平均需要の 3%)。電源 I' は想定外の猛暑・極寒の到来などで起こる需給逼

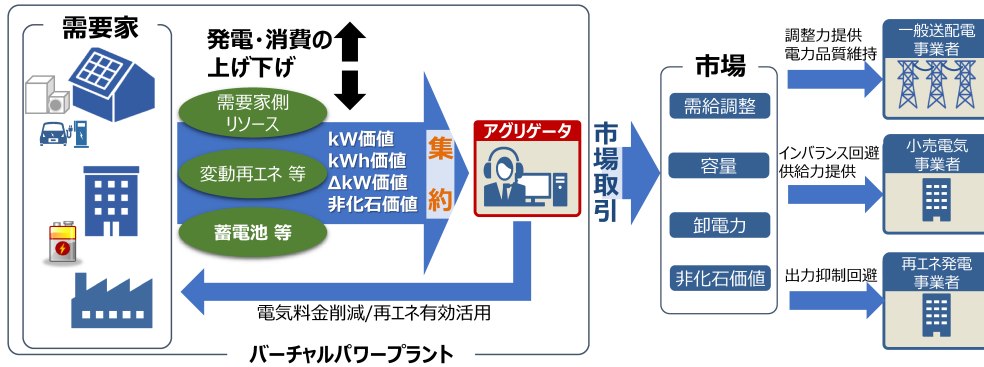


図2 バーチャルパワープラントの概要

迫（電力消費に対し発電の不足の懸念がある）時に一般送配電事業者が活用するリソースであり、電力の総消費量を削減する。年間最大12回まで、実際の動作の3時間前までに発動され、3時間の継続が求められる。VPPが供出する電力消費削減量は事前の契約で取り決められ、発動に際しては、契約削減量以上の削減（30分間平均）があれば義務を履行したことになる。これらの要件はVPPにとって対応しやすいもので、958MWが平均単価3,753円/kWで採用された。この調達には毎年行われており、2023年の実績（2024年度向けの調整電源）では、2,240MWが平均単価4,115円/kWで採用されており、2.3倍に拡大している。

4.2 VPP事業の形態と通信システム

VPP事業を行っているアグリゲータ事業者にはいくつかのコンソーシアムがあり、その代表はアグリゲーションコーディネータ（AC）と呼ばれる。ACはいくつかのリソースアグリゲータ（RA）の協力を得て需要家のリソースを束ねている。VPPの発動は、全国の一般送配電事業者が共同で使用する簡易指令システムから行われる。簡易指令システムは、米国で開発されたデマンドレスポンス用通信規格OpenADRを採用したサーバであり、ACへの指令の送付、レポートの受信などを行う（図3）。簡易指令システムの原型は早稲田大学によって開発され⁵⁾、その仕様に基づいて一般送配電事業者がシステムの多重化等、実運用に必要な条件を盛り込み実適用した。

4.3 需給調整市場とVPP適用に向けた実証事業

さらにVPPの活躍領域を拡大するために、実証事業においては2020年以降順次開設されている需給調整市場に焦点を定め、試験評価が行われてきた。需給調整市場の商品区分とその要件は、電力広域的運営推進機関（OCCTO）に専門委員会を設置して検討が行われてきており、VPPリソース対象の現時点の要件を表1に示す。全部で5つの商品区分があり、これらは調整力電源の公募における電源Iを細分化して設定されている。三次調整力②は2020年4月から、三次調整力①は2021年4月からスタートしており、残りの商品は

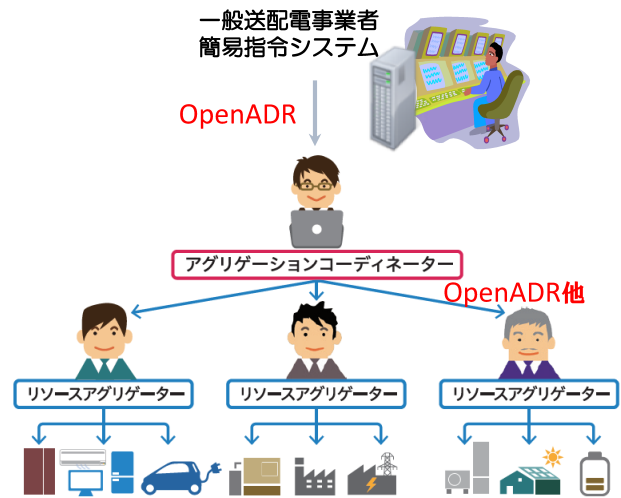


図3 バーチャルパワープラントの構成

2024年から開始される予定である。前述の電源I'と比べて、需給調整市場の要件においては次のような特徴がある：

- ・市場での約定により、ACは供出する ΔkW を一般送配電事業者にコミットする
- ・商品メニューに応じて、応動時間・継続時間・指令間隔・監視間隔が定義されている
- ・I'では、予めコミットした消費電力の下げを行うだけだが、需給調整市場ではコミットした ΔkW の範囲内で指令が一定時間（指令間隔）で変更されうる
- ・指令どおりの ΔkW の供出が求められる（不足・過剰とも不可）
- ・リソースの運用状態について、一定間隔で一般送配電事業者にレポートする必要がある（監視間隔）

VPPにより供出される調整力については、二次調整力②、三次調整力①・②において電源I'と同様に簡易指令システムを用いた発動と監視を行うことが決められ、当初想定されていた専用線での対応は不要とされた。その他、最低入札容量の1MWへの変更（通常の電源では5MW）、一次調整力にオフライン枠の設定（一次調整力全体の4%を上限に専用線によるリアルタイムでの

表 1 需給調整市場の商品区分と要件（文献 6）から抜粋して著者が作成）

| | 一次調整力 | 二次調整力① | 二次調整力② | 三次調整力① | 三次調整力② |
|-------|----------------------|---------|-----------|-----------------|-----------------|
| 回線 | 専用線、オフライン枠では不要専 | 専用線のみ | 簡易指令システム可 | 簡易指令システム可 | 簡易指令システム可 |
| 応動時間 | 10秒以内 | 5分以内 | 5分以内 | 15分以内 | 45分以内 |
| 継続時間 | 5分以上 | 30分以上 | 30分以上 | ブロック時間 (3時間) | ブロック時間 (3時間) |
| 指令間隔 | (自端制御) | 0.5～数十秒 | 5分 | 5分 | 30分 |
| 監視間隔 | 1～数秒 | 1～5秒程度 | 1分 | 1分 | 30分 |
| 最低入札量 | 5 MW オフライン枠は 1 MW | 5 MW | 1 MW | 1 MW | 1 MW |

監視を求めない枠) など、需要側のリソースが参入しやすくなるような緩和がなされてきている。実証事業においてパフォーマンスが評価されており、個々のリソースの特徴を踏まえつつ、複数リソースの組み合わせなどによって、各 VPP 事業者はどの市場にどのようなリソースで参入していくか独自の戦略を立てることによって収益最大化を目指すことになる。

なお、電源 Y については、2024 年以降は容量市場の中に用意された「発動指令電源」に引き継がれ、これまでと同等の要件のもと調達・活用がなされていくことになっている。

5. VPP の課題・展望

VPP リソースの適用は着実に広がってきているといえるが、まだまだ課題が多く、技術面でのブレークスルーや制度・ルールの見直しなどが必要である。本章ではこれらの主要な内容、動向、展望について述べる。

VPP は、その効率性や費用対効果の点から大規模な需要家やリソースを中心に進んできた。現状、住宅など低圧需要家のリソースは需給調整市場への参加が認められていない。しかしながら、今後住宅への PV 導入は一層進行すると考えられ、自家消費ニーズの高まりから蓄電池の保有、電気自動車やヒートポンプ給湯機の導入も進むことが想定される。個々の容量は小さいが夥しい数があるため、これらの低圧リソースを活用しない手はない。資源エネルギー庁は、2026 年から低圧需要家が需給調整市場に参入可能とすべく、一般送配電事業者のリソース把握の方法やこれに伴うバランシンググループの設定、計画値同時同量の扱いなどの整理を進めている⁷⁾。

つぎに、長年議論のあった機器点計量について、2026 年からの適用を目指して検討が進められている⁷⁾。蓄電池や自家用発電機などのリソースは、指令に対し正確に出力をコントロールできるが、需要家全体の消費電力を電力取引メータで計測すると、他の需要やリソースの変動の影響を受けてしまい、その補償も行いながら VPP に参加しなければならない。もし、特定機器個別

の計測によって VPP への貢献を評価してよければ、機器の性能がフルに反映されることになり、DER がより参入しやすくなる。この課題への扉が開かれようとしている。

VPP の新たな応用として、混雑緩和への適用を目指した実証事業（NEDO 事業）が行われている⁸⁾。具体的には、配電線に大量の PV が導入され、逆潮流によって配電用変電所の変圧器の容量超過、その上位系統での電流容量超過といった問題が発生する場合には、蓄電池、電気自動車、給湯機などで余剰電気を吸い上げることによって問題を回避するものである。従来の考え方では設備増強を行うことになるが、その回避ができれば効果は大きく、一般送配電事業者、VPP 事業者が実証を進めている。個々のリソースが電力システムのどこに位置しているかを特定する必要があることから、これを管理するプラットフォームが必要となり、配電線の切り替えなどにも対応した系統情報の紐づけ等の検討が行われている。

VPP の普及には、安価で安全な通信網が重要である。需給調整市場の二次調整力②や三次調整力①では、5 分の指令間隔と 1 分の監視間隔が設定されている。5 分の中で要件を満たすようフィードバック制御をかけ、かつ 1 分の監視間隔に対応するには、バラバラの複数のリソースに対して、1 分以内の細かい粒度でのデータ授受が必要となる。5G 通信の適用など先進的な取り組みも報告されており⁹⁾、この面での進展にも期待したい。

6. おわりに

まだまだ、VPP に参加するリソースの絶対量が少ない状況であるが、今後リソースは確実に増大が見込まれるため、現時点からリソース活用の価値の明確化を行うとともに、実例を作っていくことが重要である。筆者が幹事として参画しているスマートレジリエンスネットワーク¹⁰⁾では、平時においては市場参入などによる経済性の追求、また災害発生等の非常時においては、リソースを活用することによる事業継続性の確保などレジ

リエンスレベル向上といった視点から、総合的にリソース活用の意義を定量的に評価し、共有する取り組みを進めている。VPPは大きく変化している今後の電力システムにおいて中心的役割を果たす新たな技術であり、一般送配電事業者、小売事業者、アグリゲータ、需要家、政策当局が対話を重ね、英知を結集していくことが必要である。今後、ますます議論・検討が深まり、VPPがさらなる進展を遂げることを期待する。

(2023年9月29日受付)

参 考 文 献

- 1) International Energy Agency: World Energy Outlook 2018 (2018)
- 2) 資源エネルギー庁: エネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネス検討会, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/energy_resource/index.html
- 3) 資源エネルギー庁ホームページ, https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/advanced_systems/vpp_dr/download-2.html#page3-2
- 4) 資源エネルギー庁ホームページ, VPP・DR普及に関する施策, https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/advanced_systems/vpp_dr/measure.html
- 5) 石井・広橋: VPPを支える基盤システム, 電気学会誌, **139-3**, 144/147 (2019)
- 6) 電力広域的運営推進機関: 第26回需給調整市場検討小委員会・資料3, 需給調整市場における簡易指令システムの適用範囲および専用線に用いる通信方式について, https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/jukyuchousei/2021/files/jukyushijyo_26_03.pdf (2021)
- 7) 資源エネルギー庁: 第6回次世代の分散型電力システムに関する検討会・資料6: 中間とりまとめ, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/jisedai_bunsan/pdf/20230314_1.pdf (2023)
- 8) 資源エネルギー庁: 第4回次世代の分散型電力システムに関する検討会・資料4: NEDO電力システムの混雑緩和のための分散型エネルギーリソース制御技術開発 (FLEX DER) 事業の概要, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/

[jisedai_bunsan/pdf/004_04_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/jisedai_bunsan/pdf/004_04_00.pdf) (2023)

- 9) 資源エネルギー庁: 第1回次世代の分散型電力システムに関する検討会・資料6-4: アグリゲーター事例と課題 (2022)
- 10) スマートレジリエンスネットワークホームページ, <https://s-reji.com/>

[著 者 紹 介]

いし い ひで お
石 井 英 雄 君



1988年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。東京電力(株)入社。1989年~1991年マサチューセッツ工科大学客員研究員。2014年より早稲田大学研究院教授兼スマート社会技術融合研究機構事務局長(現職)。博士(工学)。主に、再生可能エネルギー導入、デマンドレスポンス、分散エネルギー資源統合に係るプロジェクト、国際標準化等に従事。電気学会、エネルギー資源学会、日本物理学会、IEEE、CIGRE会員。2020年よりIEC TC 8 SC 8C 国際議長。

はやし やす ひろ
林 泰 弘 君



1991年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。1994年同大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。茨城大学工学システム工学科講師、福井大学工学部電気・電子工学科助教授を経て、2009年4月より早稲田大学大学院先進理工学研究科電気・情報生命専攻教授。同年9月より先進グリッド技術研究所所長、2014年7月よりACROSS機構長、2022年12月より同機構会長、早稲田大学カーボンニュートラル社会研究教育センター所長、現在に至る。博士(工学)。主として、電力システムの計画・運用・制御の高度化、再生可能エネルギー電源と可制御負荷と送配電系統との協調運用・制御の最適化、需要家側エネルギーマネジメントシステムとデマンドレスポンスに関する研究に従事。2008年電気学会学術振興賞受賞、電気学会フェロー、IEEE会員。