

電力系統安定化のための蓄電池アグリゲーション技術の開発および実証評価

Development of Residential Storage Battery Aggregation for Power System Stabilization

渡辺 健一
Kenichi Watanabe

上野 貴雅
Takamasa Ueno

溝端 竜也
Tatsuya Mizobata

要 旨

太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、電力の需給調整に要する調整力の不足が予想されており、需要側に設置された機器を新たな調整力とする仕組みとして、バーチャルパワープラントが注目されている。筆者らは住宅用蓄電池を統合制御し調整力として活用する蓄電池アグリゲーション技術の開発に取り組んでいる。本稿では、開発技術および実証実験の結果を報告する。開発した蓄電池アグリゲーション技術は0-1整数計画問題により各蓄電池の運転モードを決定する方式であり、蓄電池の劣化抑制や運転モード指令を送信するための通信量抑制を特徴とする。実証実験では、アグリゲーションコーディネータを模擬したサーバからの制御指令に対して複数の蓄電池が5分以内に制御を開始し、平均誤差10.5%で制御していることを確認した。

Abstract

With the rapid increase in renewable energy generators, a shortage of control reserve for power balance between supply and demand is expected. A virtual power plant (VPP) is a new type of power plant that aggregates energy resources installed on demand sides as control reserve. We developed a battery aggregation technology to control residential storage batteries and maintain the power balance. In this study, we described and evaluated this technology in an actual experiment. The technology determines an operation mode of each storage batteries by solving the 0-1 integer programming problem. Moreover, we confirmed that the control accuracy is approximately 10% in an experiment with actual batteries.

1. はじめに

太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの導入が促進されているが、これらは天候によって出力が変動する。一方で、一般送配電事業者は、電力の需要と供給の不均衡を一定範囲に抑えるために、火力発電などの発電出力を調整（以降、電力需給調整）する必要がある。再生可能エネルギーのさらなる導入による出力変動の増加に備えて、電力需給調整のための調整力の確保が求められる。そこで、需要家側に設置された蓄電池、発電機、負荷機器など（以降、エネルギーリソース）を統合制御し、電力需給調整に活用する仕組みが検討されている。この仕組みは、あたかも1つの発電所のように機能することからバーチャルパワープラント（以降、VPP）と呼ばれ、再生可能エネルギー普及に必要な調整力確保のためのインフラ投資低減に向けた仕組みとして期待が集まっている。こうしたなか、VPPに必要な技術構築に向け、経済産業省主導のもと、2016年度から5か年計画で実証事業が行われている[1]。

当社は住宅用・産業用の小型・中型の蓄電池を開発しており、筆者らはマンションや戸建てに分散設置された数百台から数万台の蓄電池を統合制御するアグリゲーション技術の開発に取り組む[2]、VPPに必要な技術要素の抽出および技術構築を目指している。開発した蓄電池ア

グリゲーション技術を評価するため、当社は2017年度からリソースアグリゲータ（需要家のエネルギーリソースを直接制御して電力需給調整などのサービスを提供する事業者）として実証事業に参画している。本稿では、開発した蓄電池アグリゲーション技術、および実証実験による評価結果について報告する。

2. VPPシステムの構成

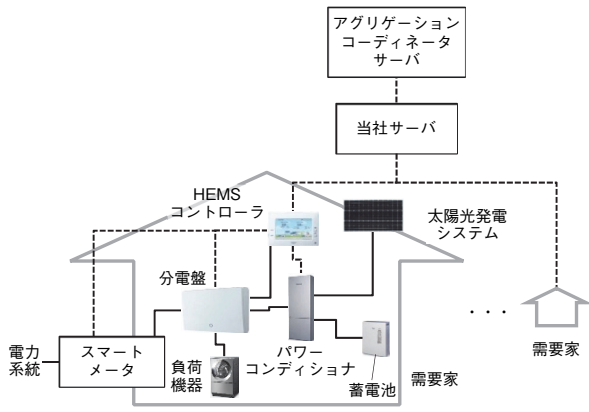
実証実験に用いたVPPシステムの構成を第1図に示す。VPPシステムは、各需要家に設置されたHEMS (Home Energy Management System) コントローラ、エネルギーリソースである蓄電池と太陽光発電装置から構成される創蓄連携システム、スマートメータ、およびインターネット経由でHEMSコントローラと接続された当社サーバで構成される。さらに、当社サーバはアグリゲーションコーディネータ（リソースアグリゲータが提供する調整力を束ね、一般送配電事業者や電気を販売する小売電気事業者と直接電力取り引きを行う事業者）が管理するサーバと接続される。第1図において、実線は電力線、破線は通信線を表している。

当社サーバは、各HEMSコントローラから以下のデータを収集する。

1. 需要家の購入電力（以降、買電電力）

2. 需要家の購入電力量（以降、買電量）
3. 蓄電池の定格入出力
4. 充放電可能量

当社サーバは、アグリゲーションコーディネータのサーバから制御指令を受信した場合、各需要家のHEMSコントローラから収集した情報に基づいて、各蓄電池の運転モード（充放電モードまたは待機モード）を決定し、各HEMSコントローラへ運転モード指令を送信する。各HEMSコントローラは、運転モード指令に基づいて、蓄電池の運転モードを制御する。なお、各HEMSコントローラには、充放電電力ではなく、ECHONET Lite^(注1)規格 [3]の必須プロパティである運転モードを指令するようにしている。



第1図 VPPシステム構成図
Fig. 1 VPP system configuration

3. 蓄電池アグリゲーション技術

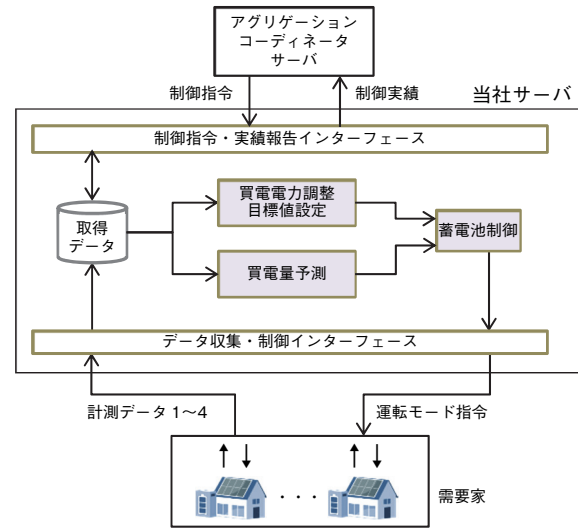
3.1 開発技術の概要

電力需給調整を実現するための蓄電池アグリゲーション技術（以降、開発技術）の構成を第2図に示す。第2図では、矢印線は情報の流れを表している。開発技術は買電電力調整目標値設定、買電量予測および蓄電池制御で構成される。アグリゲーションコーディネータの制御指令を受信してから蓄電池が充放電を開始するまでの時間を短縮するため、買電量予測は制御指令有無にかかわらず常時行う。アグリゲーションコーディネータのサーバから制御指令を受信した場合、買電電力調整目標値設定、蓄電池制御が順に実行され、各HEMSコントローラへ運転モード指令を送信する。

本章では、開発技術の特徴である買電電力調整目標値設定、買電量予測、および蓄電池制御について詳述する。

(注1) (一社) エコネットコンソーシアムの登録商標

なお、本稿では、説明簡易化のため、買電電力を下げる方向に制御する場合、すなわち蓄電池における放電の制御を実施する場合のみについて記載する。



第2図 開発技術の機能構成図
Fig. 2 Function configuration

3.2 買電電力調整目標値設定

ある時点 t における、需要家全体の買電電力目標値（以降、買電電力調整目標値）を算出するため、エネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネスに関するガイドライン[4]で規定されているベースライン算出方法に基づき、ベースラインを算出する。ベースラインは制御指令がなかった場合に想定される需要家全体の買電電力である。制御指令はベースラインを基準に買電電力をどの程度上げ下げするのかが示す値であり、買電電力を下げる方向に電力需給調整する場合、(1)式のとおり、ベースラインからアグリゲーションコーディネータから受信した制御指令値を引いた値が買電電力調整目標値 $TV(t)$ となる。(1)式において、 $BL(t)$ は30分単位（以降、デマンド時限）のベースライン、 $DE(t)$ は時点 t における制御指令であり、単位はそれぞれkWである。買電電力調整目標値 $TV(t)$ は後述する蓄電池制御で利用される。なお、蓄電池は放電した電力を電力系統に逆潮流しないため（以降、逆潮流制約）、(1)式では $TV(t) \geq 0$ とする。

$$TV(t) = \max(BL(t) - DE(t), 0) \dots\dots\dots (1)$$

3.3 買電量予測

買電量予測は一般送配電事業者の管区ごとに、買電量を予測することを目的とする。予測期間は現時点 t から制御間隔 CT 間で、予測対象は当社サーバに接続した需要家

全体の買電量，および蓄電池が設置された需要家ごとの買電量である．それぞれの予測値を総買電量予測値および買電量予測値と呼称する．これらの予測結果は後述する蓄電池制御で利用される．

3.4 蓄電池制御

はじめに，買電電力を買電電力調整目標値 $TV(t)$ に近づくよう制御するのに必要な蓄電池全体の放電電力について記述する．蓄電池全体に放電させる電力である総放電電力 $V(t)$ を(2)式に示す．

$$V(t) = \max(DP(t) \times \frac{60}{CT} - TV(t), 0) \quad \dots\dots\dots (2)$$

(2) 式中の $DP(t)$ は，ある時点 t における総買電量予測値であり，単位はkWhで制御間隔 CT に応じてkWに変換している．また， $TV(t)$ は買電電力調整目標値である．なお，本稿では放電についてのみ記述するため， $V(t) \geq 0$ とする．また，(2)式では表現していないが，過剰な制御を抑制するため，所定の不感帯を設け，算出した総放電電力 $V(t)$ が不感帯に含まれる場合は，総放電電力 $V(t)$ の値を0とする．

次に，蓄電池の運転モードを決定する方式について記述する．ここで，複数蓄電池の制御方式として，参考文献[5]のように，サーバの処理負荷を低減するために全蓄電池に同一指令を送信し，徐々に目標値に近づけていく制御方式が考えられる．しかし，小型・中型の蓄電池を制御対象とした場合，制御する蓄電池の台数が多くなり，通信量や通信遅延が懸念されるため，サーバ側で運転モードを決定する方式とする．制御方針の1つとして，放電は蓄電池の劣化（コスト）に影響するため，必要以上に放電が行われないように運転モードを決定する．前述のとおり，本稿では，買電電力を下げる方向に制御する場合について記載するため，運転モードは放電モードと待機モードの2種類となる．

蓄電池の運転モードを決定するための最適化問題を(3)式および(4)式に示す．(4)式で表される制約条件のもとで，(3)式を最小化する，各蓄電池の運転モードを求める．(3)式中の x が運転モード（求める解）であり，1の場合は放電モード，0の場合は待機モードとなる．また，

$$\text{Min} \sum_{j=1}^n \frac{\text{制御回数}_j + 1}{\max(\text{制御回数}_1, \dots, \text{制御回数}_n) + 1} \times |x_j - x'_j| + x_j \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{Subject to} \sum_{j=1}^n \min \left(\text{定格出力}_j, DP_j(t) \times \frac{60}{CT}, \text{放電可能量}_j \times \frac{60}{CT} \right) \times x_j \geq V(t)$$

$$x_j \in \{0, 1\}, x'_j \in \{0, 1\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

x' は過去の時点 $(t-CT)$ で決定した運転モードであり， x と同様の値をもつ．

(3)式は0-1整数計画問題の目的関数であり，制御指令期間における蓄電池間の制御回数差およびある時点 t で運転モードを変更する蓄電池数を最小化するための目的関数と，運転モードを放電モードに変更する蓄電池数を最小化するための目的関数の総和となる．制御回数差を最小化しているのは均等に蓄電池を制御するためであり，運転モードを変更する蓄電池数を最小化することで制御指令期間中に放電モードに頻りに切り替わるのを抑制している．また，運転モードを放電モードに変更する蓄電池数を最小化することで，必要以上の放電が行われないようにしている．

(4)式は，放電モード時における蓄電池の推定放電電力の総和を，総放電電力 $V(t)$ に近づけるための制約条件である．買電電力を下げる方向に電力需給調整するため，放電電力が不足するよりも過剰に放電する方が調整力として貢献度が高いものと考え，総放電電力 $V(t)$ 以上としている．(4)式中の定格出力，放電可能量，買電量予測値 $DP_j(t)$ のうち小さい値が推定放電電力となる．買電量予測値 $DP_j(t)$ で放電電力を制限することで逆潮流制約条件を満足し，推定精度を高めている[2]．制約条件を満たす最適解が求まらない場合は，すべての蓄電池を放電モードに変更し，可能な限り放電電力の総和が総放電電力 $V(t)$ に近づくように算出している．

(3)式の目的関数で運転モードを変更する蓄電池数を最小化するようにしているが，現時点 t で決定した運転モードが，過去の時点 $(t-CT)$ で決定した運転モードから変更があった蓄電池のみに対して運転モード指令を送信する．運転モードに変更のない蓄電池に運転モード指令を送信しないようにすることで通信量を削減できる．

4. 実証実験

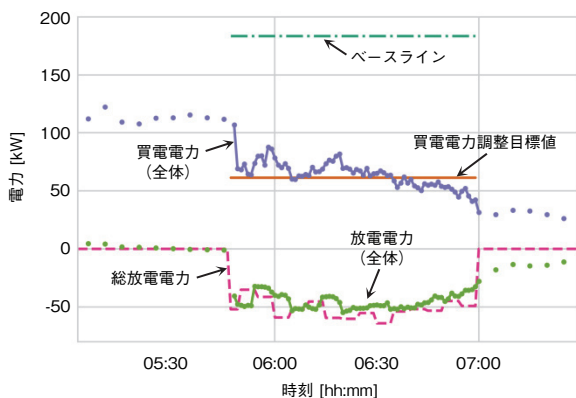
関東地域，関西地域，九州地域それぞれに設置した複数の蓄電池を対象として，開発技術による電力需給調整の性能を評価するため，実証実験を実施した．実施時間は1時間とし，太陽光発電の出力が小さい6時から7時の間で実施した．アグリゲーションコーディネータの機能は模擬サーバで代用し，模擬サーバから開始時刻の約15分前に制御指令を送信した．また，ベースラインには代替ベースラインである事前予測[4]を採用し，6時の4時間前から1時間前までの6デマンド時限における買電電力の平均値としている．その他の実証実験の諸元を第1表に示す．

第1表 実験パラメータ

Table 1 Actual experimental parameters

模擬サーバからの制御指令		開始時刻15分前に指令 持続時間中一定値
持続時間		1時間
反応時間		即時
実証対象地域		関東地域 関西地域 九州地域
制御周期		5分
計測周期		1分~5分
ベースライン		事前計測 [4]
蓄電池	導入台数	関東地域：93台 関西地域：54台 九州地域：18台
	1台あたりの 定格容量/定格出力	5.6 kWh/2 kW

実証実験の結果を第3図、第2表に示す。第3図は関東地域での実験結果である。各線は、ベースライン、ベースラインと制御指令値から算出される買電電力調整目標値 $TV(t)$ 、総放電電力 $V(t)$ 、各蓄電池が実際に放電した電力の総和、買電電力の総和を示している。第3図より、5:47頃に制御指令を受信後、5:48には総放電電力 $V(t)$ に基づいて放電を開始し、5:49には買電電力が買電電力調整目標値 $TV(t)$ 付近まで下がっていることがわかる。その後、7時まで買電電力を買電電力調整目標値付近に維持できていることがわかる。なお、7時以降も放電が継続しているのは、当社サーバからの制御終了後、各蓄電池が需要家の設定した運転モードに復帰し、放電を行っているためである。制御指令に対する、ベースラインから買電電力の実績値を引いた値の誤差（以降、制御誤差）を第2表に示す。



第3図 開発技術による需給調整結果

Fig. 3 Experimental results

第2表 制御誤差と通信量

Table 2 Experimental results

	関東地域	関西地域	九州地域	3地域平均
制御誤差 [%]	5.7	7.2	18.7	10.5
従来方式に対する、 開発方式での 通信量の比率 [%]	21.1	34.5	31.7	29.1

第2表において、制御誤差は平均絶対誤差率で算出しており、関東地域の場合5.7%となっている。九州地域の制御誤差が大きくなっているが、これは蓄電池の設置台数が18台と少なく買電量予測や推定放電電力の誤差が大きくなったことが原因である。また、3地域の平均誤差は10.5%となった。

次に、運転モード指令を送信するための通信量について評価を行った。第2表の下段に結果を示す。開発技術のように、運転モードを変更する蓄電池数を最小化し、現時点 t で決定した運転モードが、過去の時点 $(t-CT)$ で決定した運転モードから変更があった蓄電池のみに対し、運転モード指令を送信する方式と、運転モードの変更有無にかかわらず常にすべての蓄電池に運転モード指令を送信する方式（以降、従来方式）とを比較した結果、開発技術では従来方式に対し3地域平均で29.1%の通信量で制御することができた。すなわち、従来方式に対し70.9%の通信量を削減することができた。今回の実証では、1地域あたり100台未満であったが、筆者らは数万台規模の蓄電池を束ねることを想定しており、今後台数が増加した場合、運転モード指令の送信に時間がかかり、電力需給調整の精度が悪化する可能性がある。すべての蓄電池に運転モード指令を送信する方式と比べ、開発方式では約3.4倍の需要家を対象とすることができ、大規模なVPPシステムにも有効な方式であることが実証された。

今後の課題として、制御誤差のさらなる向上が考えられる。実証実験では、関東地域において5.7%の制御誤差で制御できることを確認したが、1分データでみた場合、第3図の5:58や6:19のように一時的に誤差が大きくなっている。これは買電電力の変動に対して買電量予測の誤差が大きくなり、実際に放電された電力が推定放電電力よりも小さかったためである。買電量予測や蓄電池制御の精度を向上させ、制御誤差の改善を図る。また、将来的には、調整力の拡大に向け、蓄電池や燃料電池といったエネルギーリソースからの逆潮流が行われることも考えられる。蓄電池が逆潮流するようになった場合における、蓄電池制御の検討も今後の課題である。

5. まとめ

本稿では、再生可能エネルギーの導入拡大による調整力不足の低減に向け、複数の住宅用蓄電池を統合的に制御し調整力として活用する蓄電池アグリゲーション技術について報告した。実証実験での評価により、制御指令に対して誤差10.5%で制御できることを確認した。また、開発技術は、通信量を平均70.9%削減でき、大規模なVPPシステムにも有効であることが実証された。今回検討した調整力提供などを通じて、今後蓄電池の付加価値の向上が進むことで、蓄電池のさらなる導入メリットが得られると考えられる。

今後は、エネルギーリソースとして蓄電池のみならず、燃料電池やヒートポンプ給湯機なども対象とした制御方式を開発するとともに、エネルギーリソースからの逆流が行われる場合の制御方式の開発を目指す。

本稿におけるVPPシステム開発の一部は経済産業省資源エネルギー庁の平成29年度「需要家側エネルギーリソースを活用したバーチャルパワープラント構築実証事業費補助金」の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 経済産業省, “エネルギー革新戦略,” <http://www.meti.go.jp/press/2016/04/20160419002/20160419002-2.pdf>, 参照 Oct. 20, 2018.
- [2] 渡辺健一 他, “住宅用蓄電池群による電力系統安定化のための連携制御技術,” パナソニック技報, vol.6, no.1, pp.64-69, 2016.
- [3] (一社) エコネットコンソーシアム, APPENDIX ECHONET 機器オブジェクト詳細規程, https://echonet.jp/wp/wp-content/uploads/pdf/General/Standard/Release/Release_H_jp/Appendix_H.pdf, 参照 Oct. 20, 2018.
- [4] 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・ビジネスに関するガイドライン (平成29年11月29日改定),” <http://www.meti.go.jp/press/2017/11/20171129001/20171129001-1.pdf>, 参照 Oct. 20, 2018.
- [5] ダイヘン, “自律分散協調制御技術 Synergy Link (シナジーリンク),” http://www.daihen.co.jp/ems/synergy_link/, 参照 Oct. 20, 2018.

執筆者紹介



渡辺 健一 Kenichi Watanabe
エコソリューションズ社 技術本部
Engineering Div., Eco Solutions Company
博士 (情報学)



上野 貴雅 Takamasa Ueno
エコソリューションズ社 技術本部
Engineering Div., Eco Solutions Company



溝端 竜也 Tatsuya Mizobata
エコソリューションズ社 技術本部
Engineering Div., Eco Solutions Company