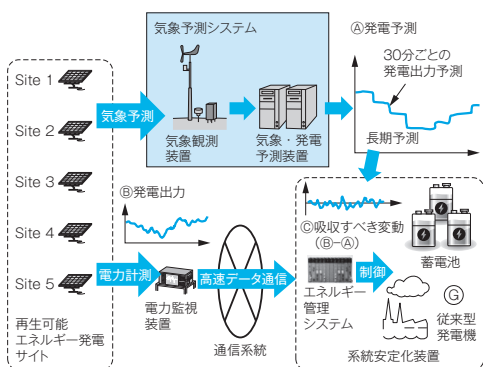


電力出力変動緩和制御の実証試験

Ashwin M Khambadkone
Inam Nutkani
Wang Aimin
奥野義道 Yoshimichi Okuno
田邊隆之 Takayuki Tanabe

キーワード スマートグリッド, マイクログリッド, 分散電源, 電力安定化, 蓄電池, PV

概要



電力出力変動緩和制御システム

当社は、2014年度シンガポールにおいてエネルギー市場監督庁（EMA）から発行された2014スマートグリッド研究公募に、マイクログリッド実証試験センター（EPGC）とシンガポール電力（SPPG）の共同で「電力出力変動緩和制御の実証試験」のテーマで応募をし、採択された。

研究では、次の3つの実験を2015年度から3年間で実施する。

- (1) RAPID@EPGC（EPGC 担当） 即効性の高い予備力活用技術とその制御の実証及び評価
- (2) 太陽光発電（PV）出力抑制（EPGC 担当） PVインバータの変動抑制制御を研究開発
- (3) 広域RAPID（明電舎担当） 複数のPVサイトを束ねる集中制御で、スマートなアンシラリーサービスを最適なライフサイクルコストで提供する技術開発

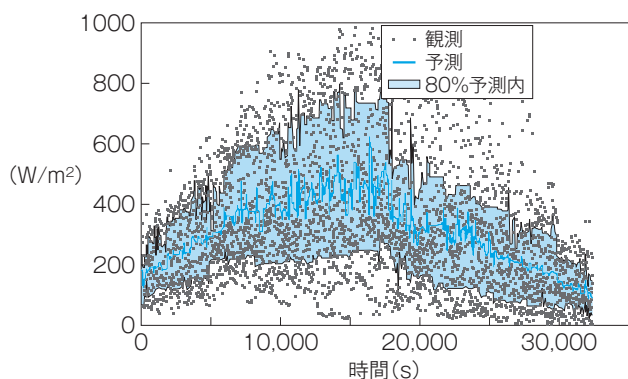
1 まえがき

当社は、2014年度シンガポールのエネルギー市場監督庁（EMA：Energy Market Authority）から発行された「2014スマートグリッド公募（SMART GRID GRANT CALL 2014）」に、マイクログリッド実証試験センター（EPGC：Experimental Power Grid Centre）とシンガポール電力（SPPG：Singapore Power grid Ltd.）と実施する2015年度から3年間の共同研究として「電力出力変動緩和制御の実証試験：RAPID Rate Power Injection Demonstrator（RAPID）」のテーマで応募し、採択された。本稿では、電力出力変動緩和制御の実証試験の詳細を紹介する。

2 共同研究の目的

再生可能エネルギー電源の電力系統への普及は、電源の持つ不確実特性と変動特性によって、電力系統の安定性と信頼性に悪影響を与える。特にシンガポールでの日照は、非常に断続的かつ不確定であることが確かめられてきた（第1図）。そのためシンガポール島への太陽光発電の普及は、電力系統に大きな変動をもたらすことが予想される。

これを克服するためには、電力予備力による変動調整が必要である。今回の公募前に実施された、エネルギー市場監督庁（EMA）の電力系統運用（PSO）部門とEPGCが共同で実施したプロジェクトでは、グリッド周波数変動（0, 2Hz）を保つための断続発電閾値（IGT）限界値（600MW）を算出した。シンガポールの太陽光発電の断続性（毎分45～80%の



第1図 断続的かつ不確定な日照 (EPGC屋上データ)

シンガポールでの日照は、非常に断続的かつ不確定であることが確かめられてきた。そのためシンガポール島への太陽光発電の普及は、電力システムに大きな変動をもたらすことが予想される。

変化)に対する電力変動率は非常に高く、かつそれは太陽光発電(PV)の連系量増加に伴って増加する。したがって系統安定化のためには、需給調整のための予備力に高速な応答性が必要である。

一方、先の再生可能エネルギー電源の電力系統への統合に関するNRELによる研究⁽¹⁾によると、再生可能エネルギー電源普及の結果、調整運用のための予備力が増加する傾向が見られた。また、新しい予備力の運用と調整の方法が必要とされていることも判明した。現在、調整余力を決定する方法は、静的な予備力の条件で支配されている。時には1日に必要な予備力が、単一の値で決定されている。しかし、これは断続的かつ不確定でもある再生可能エネルギー電源の高い普及に対するものとしては不十分であると考えられる。電力システムの安定性と信頼性を向上させ維持するためには、ランプ(急変)変動の傾斜率の増減に応じて動的に変動する予備力の考えが必要となる。

Agoraの報告書⁽²⁾によると、ドイツの再生可能エネルギー電源の普及に対し、より広いランプ変動の傾斜の追従能力が、再生可能エネルギー電源の高い普及で必要とされていることが判明した。50%の再生可能エネルギー電源普及率の下では、約10GWの発電所で極端な負荷変動へ追従するために、5分間で4GWの増加方向のランプ変動に対応する能力が必要である。同様に、5分間で8GWの低下方向のランプ変動への対応が必要とされる⁽²⁾。したがって、再

生可能エネルギー電源の急速な変化への対応を可能にするランプ変動の傾斜率に対する系統予備力の増強は、IGT制限を増やすための潜在的なソリューションとなる。しかしながら、この変動率は地理的条件や再生可能エネルギー電源の分布で変化する。したがって、ドイツで提案されたソリューションは、シンガポールでは容易に適用することはできない。

また、再生可能エネルギー電源の普及に伴って、電力市場における予測困難な価格変動が増加する恐れがある。再生可能エネルギー電源は優先的な供給力と見なされるため、既存の発電機は需要電力に応じて出力を調整する必要がある。市場価格は、限界の発電量によって決められる。したがって、電力価格は既存の発電機の出力レベルに応じて変動する。ドイツの電力市場では、PVと風力発電からの優先的な電力供給で、平均市場価格が低下している⁽²⁾。2013年6月16日にドイツの電力市場で、太陽光発電と風力発電の想定外の急激な発電出力の増加によって、メガワット時(MWh)当たり-100ユーロの価格を導いた⁽³⁾。

シンガポールでは、天候の速い変化は太陽光発電の急激な変化を引き起こす可能性がある。そのため、価格の変動も太陽光発電の高い普及に対して問題になる可能性がある。段階的に変動する予備力とその制御は、シンガポールでの太陽光発電の急激な変化に対処するためのソリューションであり、またそれは電力市場の価格安定をもたらす。より良い機会均等市場とするためには、再生可能エネルギー電源に全ての優先権を与え、既存の発電機に需給バランスの責任を押し付ける方法ではなく、全ての電源に安全な運用を維持するための責任を取れるように、市場は作られるべきである。例えば、電力システムの安定性に対する再生可能電力の断続性の影響を最小限にするために、プエルトリコ電力局(PREPA)は、風力と太陽光発電の両方で1分間のランプ変動の傾斜率変化を満たす値として、10%の定格限界容量を定めている(MW/分)⁽⁴⁾。将来の電力市場は、調整力があり信頼性の高いエネルギー資源に報酬を与えるように設計されるべきである⁽²⁾。そうなれば、再生可能エネルギー電源の変動を改善するための調

整力を増強する制御可能な発電資源に、より多くの投資を引き付けられることができる。エネルギー貯蔵は潜在的に、この役割を担うことができる。

しかしこのソリューションには、現在次のような課題がある。何処にどれだけの容量のエネルギー貯蔵が必要か。また、どのようにエネルギー貯蔵リソースを制御する必要があるか。電力変動はPVインバータを介して制御できるか。もしそうであれば、それはエネルギー貯蔵なしで制御できるか。これらの課題は現時点では、まだ解決されていない。必要なのは、評価し、危険にさらされないシステムを確保しながら、現実的なシステムに似た条件で高速の調整力制御技術を実証するための「開かれた」プラットフォームである。これらの課題に対する解を求めるのが、このプロジェクトの目標である。

さらに本プロジェクトは広域の監視制御を集約し、最適なりソースとして動作させることができる分散型エネルギー貯蔵システム (DESS: Distributed Energy Storage System) のソリューションを提案する。

本プロジェクトでは、前者のオープンプラットフォームをRAPID@EPGCと呼び、後者のDESSを広域RAPIDと呼ぶ。

3 システム開発概要 (プロジェクトの説明)

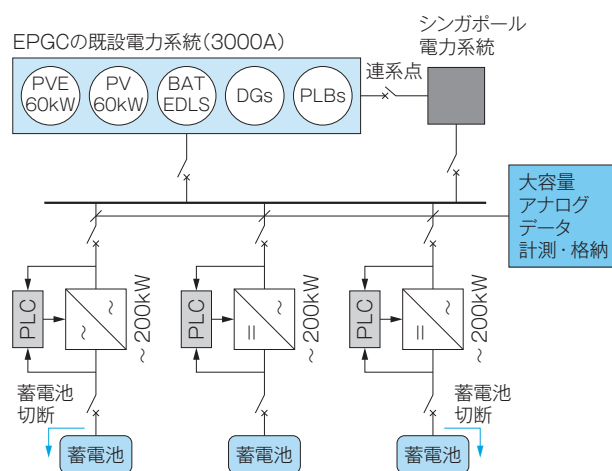
再生可能エネルギー電源の普及拡大に伴う断続性と不確定性の問題を克服するために、エネルギー貯蔵を調整予備力として用いるフェージビリティスタディが行われている。一部の国では、揚水発電機が使用されてきたが、その解決策はシンガポールには適用できない⁽⁵⁾。シンガポールのためのエネルギー貯蔵技術は、小さな規模で費用対効果を持つ必要がある。電力システムにおけるエネルギー貯蔵はエネルギー取り引き、制御及び異なる新規投資 (ほとんどはライフサイクルコストである) について研究されてきた⁽⁶⁾⁽⁷⁾。本プロジェクトでは、特にシンガポールの日照及び電力システムに固有な断続性とふくそう問題に対する技術ソリューションに焦点を当てた。本

研究は、シンガポールの電力システムに対するアンシラリサービスビジネスの成長を促進し、PVの迅速な展開を容易にする効果を持つと期待される。

3.1 RAPID@EPGC (EPGC担当)

本プロジェクトでは、即効性の高い予備力活用技術と、その制御の実証及び評価のための電力出力変動緩和制御の実証試験 (RAPID) 方式を開発する。**第2図**にシステムアプリケーション用に異なる蓄電技術の実験が可能なRAPIDプラットフォームを示す。

提案システムは、完全にプログラム可能なインバータ、交換可能な交流及び直流のエネルギー貯蔵システム、膨大なアナログデータの記録及び分析システムから構成される。それらはオープンで、蓄電池の種類など特定の技術に依存しないプラットフォームを構築することで、業界に受け入れやすい構造とした。このプラットフォームは、異なるエネルギー貯蔵技術の開発、テスト、制御アルゴリズムの評価、及び特長付けを容易にする。エネルギー貯蔵インバータ用のプログラマブルコントローラによって、EPGCでシンガポールの電力システムと同様の条件 (システム内の周波数調整、電圧規格、PVの平準化) で異なる制御アルゴリズムを容易に導入・試験することができる。このような調整力はエネルギー貯蔵システムの可変量制御を可能とし、PVによる高速の電力変動による影響を軽減して最小にする。同様に、



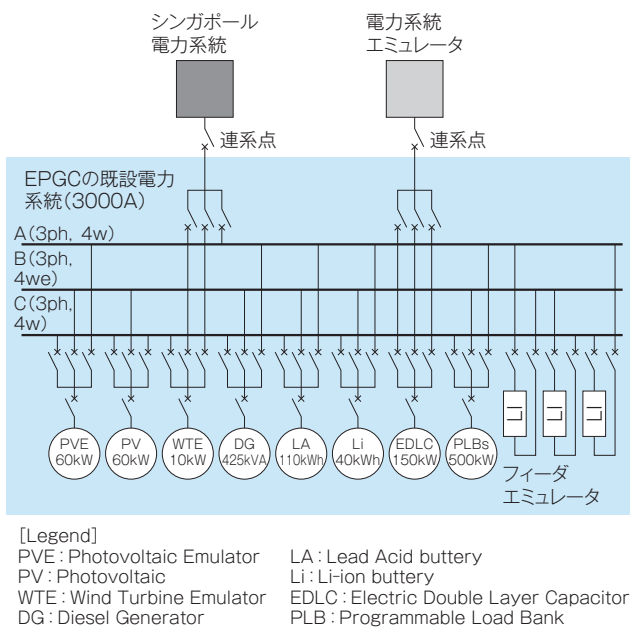
第2図 システムアプリケーション用に異なる蓄電技術の実験が可能なRAPIDプラットフォーム

即効性の高い予備力活用技術と、その制御の実証及び評価のための電力出力変動緩和制御の実証試験 (RAPID) 方式を示す。

本プロジェクトで提案のRAPIDプラットフォームは、リアルタイムでの膨大なアナログデータの出力を利用しており、交流と直流、両方の異なるタイプの貯蔵技術の試験と特性評価を可能にする。エネルギー貯蔵システムは、断路器による切断で置き換えができる。この特長は、特定の蓄電技術に依存しないプラットフォームを形成する。この特長によって、プログラムできるインバータと電力系統（EPGCの既存の電力系統又はシンガポール電力網のどちらにも）を結合することで、様々な業界のパートナーがこのプラットフォームを実系統と同等の条件で、エネルギー貯蔵技術の試験に使用することができる。

また既存のEPGC電力系統は、柔軟な電力網アーキテクチャと分散電源（DER：Distributed Energy Resource）を利用して、PVの普及レベルと系統条件の異なる複数のシナリオを試験することができる。第3図にEPGCの既存設備を示す。

EPGCはジュロン島に1MW実験系統を所有し、それには建屋屋上の60kWのPVアレイと2×30kWのPVエミュレータを含む。したがって、EPGCは屋上のPVから実際のPV不確実性と断続性データを得るという利点を有している。加えてEPGCは

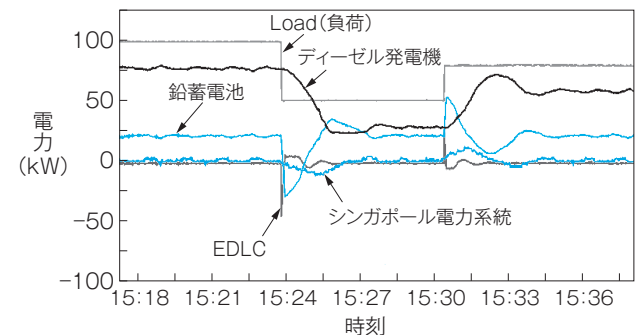


第3図 EPGCの既存設備

既存のEPGC電力系統は、柔軟な電力網アーキテクチャとDERを利用して、PVの普及レベルと系統条件の異なる複数のシナリオを試験することができる。

PVエミュレータで試験シナリオをプログラムすることもできる。また、EPGCは調整用発電機として250kVA・125kVA・50kVAの3台のディーゼル発電機を所有している。ディーゼル発電機とPVを組み合わせた高い普及率のためのシナリオを作ることができる。加えてEPGCは、ランプ変動に対する応答を研究するために使用することができる110kWhの鉛蓄電池と2×20kWhのリチウムイオン電池と150kWのEDLCを所有する。EPGCの電力系統を利用したテストケースの実験は、電力系統内の電力需要の変化の間の高速な補償のためのエネルギー貯蔵の役割の実証が行われてきた。電力系統への電力の流れの変化が需要の急激な変化が発生した場合に、電気二重層キャパシタ（EDLC）及び鉛蓄電池を使用して制御される。第4図に電力貯蔵装置を用いた変動吸収制御例を示す。

しかし、ここで注意しなければならないのは、既存のエネルギー貯蔵システムの制御量は固定のため、再プログラムができないということである（既製品システムの場合、通常はこのような仕様となっている）。しかしシステムが拡大し、より多くの再生可能エネルギー電源が普及するにしたがって、固定の制御量は最適な制御にとって問題となる。この問題に対処するために、EPGCは知的で適応性が高いランプ変動に追従し、新しい制御方式の研究開発を可能にする特定技術非依存で、オープンなプラットフォームを提案する。テストベッドは、これらの戦略の検証を助けるものである。このプロジェクトで



第4図 電力貯蔵装置を用いた変動吸収制御例

EPGCの電力系統を利用したテストケースの実験は、電力系統内の電力需要の変化の間の高速な補償のためのエネルギー貯蔵の役割の実証が行われてきた。電力系統への電力の流れの変化が需要の急激な変化が発生した場合に、EDLC及び鉛蓄電池を使用して制御される。

は、シンガポールのPV変化と電力系統規制要件シナリオに基づいて、RAPIDプラットフォームの新しいエネルギー貯蔵システムを用いた様々な電力出力戦略に対する利用を検証する。このような試験は、最初はシンガポール電力網に悪影響がないようEPGC内の実験システムを用いて実施される。シンガポール電力網から独立したEPGCの実験システムでの制御実験を試験した後、実系統評価のためEPGCにあるシンガポール電力変電所で同じシステムが試験される。将来的には、この試験プラットフォームはシンガポール電力網へのPV（そして電気自動車の充電）の影響を評価し、影響への緩和と迅速な対応のための道を開く措置に用いることができる。

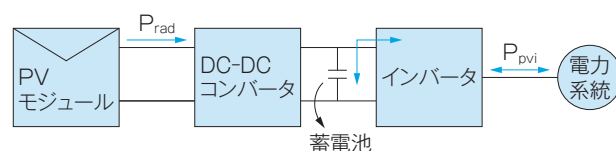
3.2 Solar PV Ramp Rate Control (EPGC 担当)

プロジェクトの第2の部分は、太陽光発電インバータの変動抑制制御の研究開発である。PVシステムの断続性は、大きな電力変動を生じる。シンガポールにおける高速の日照変化と断続性、そしてPV出力変動の実例は、**第1図**に示したとおりである。

EPGCは以前の観察（EMAと実施）から、シンガポールでは日照とPV出力変化が非常に大きいというデータを得ている。例えば、1分間でPV総量の45～80%が変化することもある。電力系統レベルでの高速のPV変化の影響を緩和するために、これまで述べてきたように高いエネルギー密度を有するエネルギー貯蔵が必要とされている。他方で、この問題はPV変動率制御で低減することができる。プロジェクトでは、PVインバータ用の変動抑制制御方式を研究開発する。PVインバータの変動抑制制御の一つの可能性として、広域のPV出力変動を緩和するために少容量のエネルギー貯蔵を付加する例を**第5図**に示す。

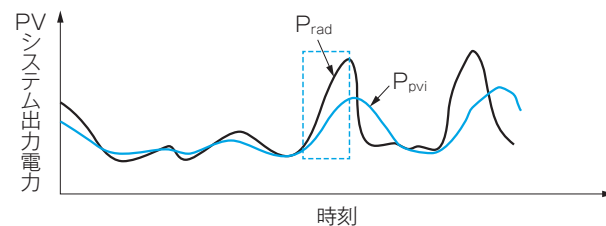
ここで、 P_{rad} は日照からの電力を示し、 P_{pvi} はPVシステムから系統への出力を示す。**第6図**に P_{rad} の典型的な動作を示す。スマートコンバータ制御は、指定されたバンド内 P_{pvi} の変化率を制御することができる。

また、エネルギー貯蔵からの適切な要素の選択と知的なコンバータの制御によって、PV変動率を制



第5図 広域のPV出力変動を緩和するために少容量のエネルギー貯蔵を付加する例

Vインバータの変動抑制制御の1つの可能性として、広域のPV出力変動を緩和するために少容量のエネルギー貯蔵を付加する例を示す。



第6図 エネルギー貯蔵を用いた変動抑制制御方式

スマートコンバータ制御は、指定されたバンド内 P_{pvi} の変化率を制御することができる。

限することができる。このことから、本方式で電力系統に分散設置するエネルギー貯蔵のサイズとコストを削減することができる。

3.3 広域 RAPID (当社担当)

RAPID@EPGCと太陽光発電の変動抑制制御の研究に加えて、プロジェクトの第3の部分は、広域RAPIDの設計と実証である。これは複数のサイト及び広域制御から成り、分散インテリジェントのアンシラリーサービスを電力系統事業者者に最適なライフサイクルコストで提供できる。当社は稚内メガソーラプロジェクトで、エネルギー貯蔵システムによって大規模PVの電力系統の安定化を実現した実績を持つ。稚内メガソーラでは、5MWのメガソーラシステムに、1.5MW×7.2hのNAS電池を併設して安定化を図った。このケースでは、エネルギー貯蔵に二つの機能を実装した。一つは、再生可能エネルギー電源をあらかじめ決められた発電計画に基づいて、一定出力で運用する機能である。もう一つは、断続性を緩和するための安定化予備力として利用する機能である。その後、分散配置された再生可能エネルギー電源を統合的に管理し、エネルギー貯蔵システムと組み合わせた新たな安定化制御が提案され、

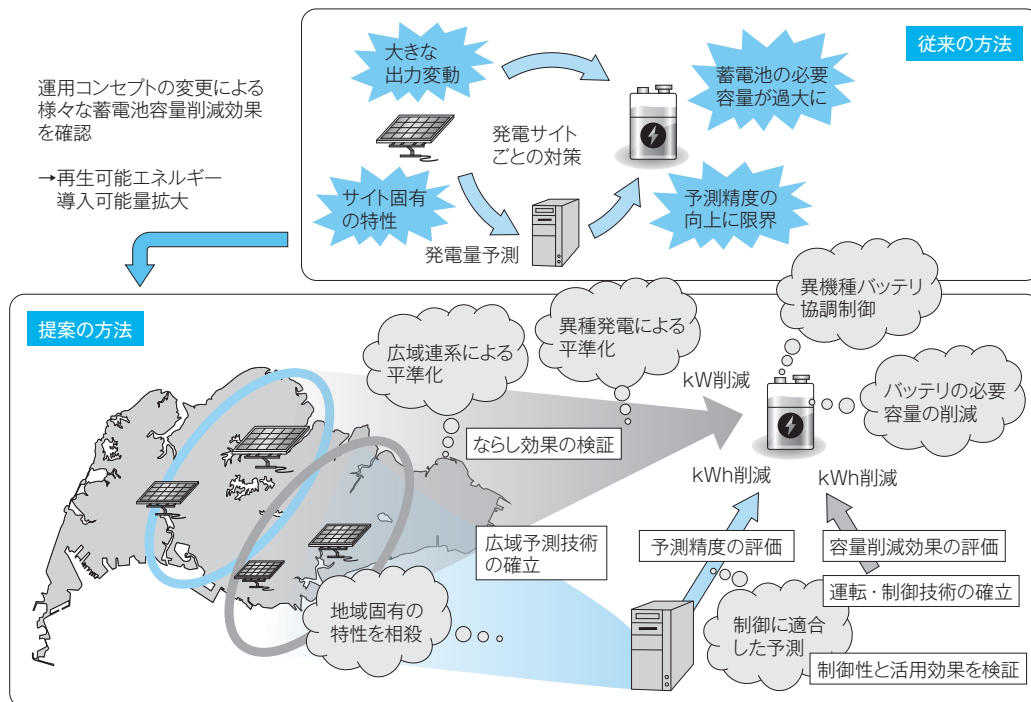
新しく効率化を図った運転を実現する技術として評価されている⁸⁾。これらのシミュレーション研究は、システムの運用効率を向上させることができ、提案の広域協調制御と最適化によって、エネルギー貯蔵の容量を減少させることができることを実証している⁹⁾。

ところが、シンガポールの電力網のような場所での再生可能エネルギー電源の普及は、大規模PVファームのための広い土地を有していないことから、小規模なPVの配置が想定される。これは、電力システムの周辺に小容量のエネルギー貯蔵を配置することが経済的に意味を成すことを示しており、断続的な発電源の増加状況を見ながら、調整予備力を設置する必要があるからである。したがって、これからここで提案する方法は、人口密集都市生活空間のようなシンガポールにより適していると言える。

最適なエネルギー貯蔵を置くことの利点は、いくつかの研究で評価されている。参考文献(10)で、著者はスマートグリッド・アプリケーションにおけるエネルギー貯蔵システムの有用性を評価するためのツールを提案した。遺伝的アルゴリズム (GA) と逐次二次計画 (SQP) 最適化方法の組み合わせを提

案している。エネルギー貯蔵運用者は、送電システム事業者にアンシリサービスを提供し、電力網の更新を延期することができることが示された。参考文献(11)では、系統内の固定分路コンデンサの最適配置と最適容量をGAとファジー論理を組み合わせた (GA-FL) 最適化手法を用いて決定している。ここでは、電力損失とエネルギー損失と固定コンデンサのコストを最小化することが目的関数となる。その結果、システムコストが最適になるようにコンデンサを配置することで、経済性を改善させることができることを示した。

しかし、利用可能なエネルギー貯蔵の持つ多くの特性と、発電出力の断続性のように地理的要因など自然に依存する幅広いバリエーションから、分散型エネルギー貯蔵の最適なサイズと配置は単純な問題ではない。このプロジェクトの第3の部分は、系統内の大きな再生可能エネルギー電源の普及に伴う断続性の問題を克服するために、経済性及び信頼性を向上させる分散型エネルギー貯蔵システムのためのサイズと運用手法を決定することである。第7図に広域RAPIDのコンセプトを示す。

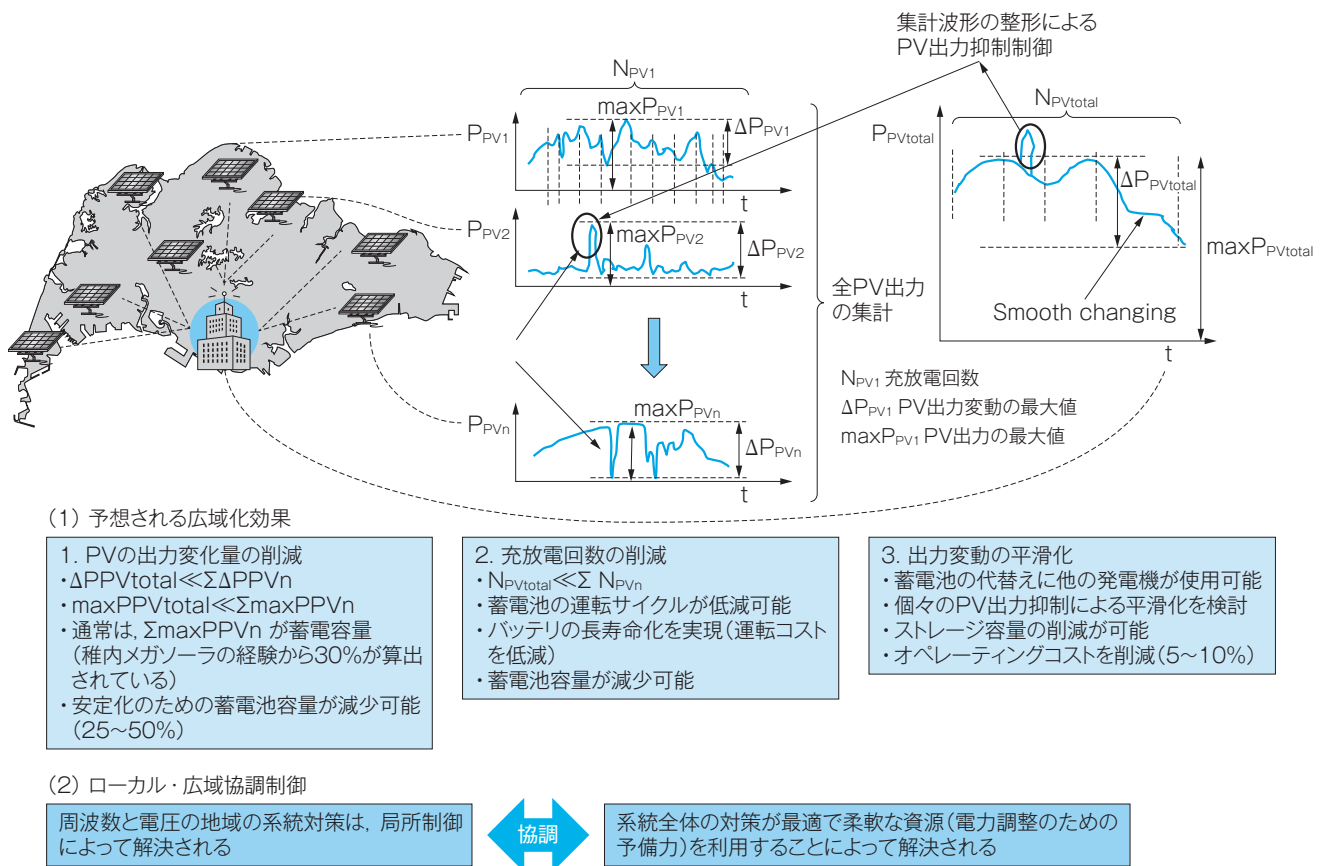


第7図 広域RAPIDのコンセプト

系統内の大きな再生可能エネルギー電源の普及に伴う断続性の問題を克服するために、経済性及び信頼性を向上させる分散型エネルギー貯蔵システムのためのサイズと運用手法を決定する。

分散型エネルギー貯蔵は、ローカルの断続的な発電のデータを使用してシステム・オペレータからの信号を統合した協調制御を必要とする。このようなシステムは、システムの全体的な費用対効果を増大する日射パターンの予測とエネルギー貯蔵の最適化されたスケジューリングが必要である。決定論的な手法と確率論的な手法を用いた知的な最適化手法で、エネルギー貯蔵容量を最小にすることが目標である（目標値はエネルギー貯蔵容量の25%削減）。**第8図**に広域RAPIDの制御方式を示す。研究の実施に当たって、本プロジェクトは実用的なアプローチを取ろうとしている。本プロジェクトは、シンガポールの様々なサイトから日射データを収集し、日射の予測研究を実施する。断続性と予測誤差の振幅に基づいて、コスト効果の高いエネルギー貯蔵装置を選択し、それらは最適な容量で最適な場所に、シ

ンガポール電力網の様々な場所に配置される。最適化することで、25%以上の電池容量の減少を期待している。しかし、このような分散型エネルギー貯蔵システムは、制御の課題を提起する。システムが成長し、新たな再生可能エネルギー電源の新たなエネルギー貯蔵装置が追加されると、変動吸収のために設計された制御パラメータが最適ではなくなるかもしれない。通常、これには再設計又は再エンジニアリングのコストがかかる⁽¹²⁾。そこで、本プロジェクトでは、システムの成長に合わせてコントローラの性能を適応させる知的な協調制御を利用する。これは、ストレージシステムの運用コストを最大で5%低減することが期待される（**第8図**）。検証には、当社とEPGC（例えばOPAL-RT）が持つ、既存のシミュレーションプラットフォームを利用して、リアルタイムでそのような協調制御方式の利点を実証する。



第8図 広域RAPIDの制御方式

分散型エネルギー貯蔵は、ローカルの断続的な発電のデータを使用してシステム・オペレータからの信号を統合した協調制御を必要とする。このようなシステムは、システムの全体的な費用対効果を増大する日射パターンの予測とエネルギー貯蔵の最適化されたスケジューリングが必要である。決定論的な手法と確率論的な手法を用いた知的な最適化手法で、エネルギー貯蔵容量を最小にする。

4 むすび

シンガポールEMAの「2014スマートグリッド公募」に、EPGCとSPPGと株明電舎の共同で応募した「電力出力変動緩和制御の実証試験：RAMP Rate Power Injection Demonstrator (RAPID)」プロジェクトの概要を紹介した。

本プロジェクトで開発されたRAPIDプラットフォーム及び関連技術は、再生可能エネルギー電源の普及を促進するために、業界だけでなく、研究のための公的機関に公開される予定である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) E. Ela, M. Milligan and B. Kirby, "Operating Reserves and Variable Generation," National Renewable Energy Laboratory, 2011
- (2) Agora Energiewende, "12 Insights on Germany's Energiewende," Agora Energiewende, 2013
- (3) "How to lose half a trillion euros," Oct., 2013
Available: <http://www.economist.com/news/briefing/21587782-europes-electricity-providers-face-existential-threat-how-lose-half-trillion-euros>.
- (4) V. Gevorgian and S. Booth, "Review of PREPA Technical Requirements for Interconnecting Wind and Solar Generation," National Renewable Energy Laboratory, Nov., 2013
- (5) U.S. Department of Energy, "Grid Energy Storage," Dec., 2013
- (6) J. Eyer and G. Corey, "Energy storage for the electricity grid: Benefits and market potential assessment guide," Sandia National Laboratories, 2010
- (7) Electric Power Research Institute, "Electricity energy storage technology options: a white paper primer on applications, costs and benefits," Electric Power Research Institute, 2010
- (8) M. Yusuke, H. Ryoichi, K. Hiroyuki, T. Atsuyuki, T. Takayuki, I. Shiho and O. Takahiro, "Cooperation of Energy Storage Systems and Biogas Generator for Stabilization of Renewable

Energy Power Plants," in IEEE Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), 2013

(9) Y. Manabe, R. Hara, K. Hiroyuki, T. atsuyuki, T. Takayuki, I. Shiho and O. Takahiro, "Cooperative Control of Energy Storage Systems and Biogas Generator for Multiple Renewable Energy Power Plants," in Power Systems Computation Conference (PSCC), 2014

(10) G. Carpinelli, G. Celli, S. Mocci, F. Mottola, F. Pilo and D. Proto, "Optimal integration of distributed energy storage devices in smart grids," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol.4, No.2, pp.985-995, 2013

(11) M. Ladjavardi and M. A. S. Masoum, "Genetically Optimized Fuzzy Placement and Sizing of Capacitor Banks in Distorted Distribution Networks," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.23, No.1, pp.449-456, 2007

(12) A. Mohd, E. Ortjohann, A. Schmelter, N. Hamsic and D. Morton, "Challenges in Integrating Distributed Energy Storage Systems into Future Smart Grid," in IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2008

(13) "Grid Energy Storage," U.S. Dept. of Energy, Dec., 2013

《執筆者紹介》



Ashwin M Khambadkone

Experimental Power Grid Centre, A*STAR



Inam Nutkani

Experimental Power Grid Centre, A*STAR



Wang Aimin

Singapore Power PowerGrid (SPPG)



奥野義道

Yoshimichi Okuno

システム事業企画部

情報通信技術開発及びスマートグリッド・エネルギーマネジメントシステム開発に従事



田邊隆之

Takayuki Tanabe

電力システム技術部

電力システムの新規事業開発に従事