

マイクログリッド間での高効率な電力利用を可能とする蓄放電機能配備および送電管理方式

鈴木 敏明^{1,2,a)} 正村 雄介¹ 村田 正幸²

受付日 2020年3月23日, 採録日 2020年10月6日

概要: 近年, 太陽光発電等による再生可能エネルギー利用の増加が促進されている. しかし, 太陽光等による発電では, 天候等により発電量が変動し, 供給電力量が不安定である. そこで, 蓄放電機器等を用いた電力供給の安定化が推進されている. たとえば, ローカルなエリアを対象として, 発電, 蓄放電, 電力消費をトータルに制御するマイクログリッドが注目されている. マイクログリッドでは, 電力の地産地消が図られるが, 単体のマイクログリッドでは, 天候等により発電した電力が不足する場合は想定される. 本論文では, マイクログリッドを複数接続した広域接続マイクログリッドを対象とし, マイクログリッド間で電力を送電した場合の送電負荷 (「送電する電力量」と「送電距離」の積) を最小化することにより, 送電ロス削減する電力利用方式を提案する. 提案方式では, 送電負荷を目的関数とする線形計画問題を解くことにより, 送電負荷削減のために必要な, 配備すべき複数の蓄放電機能の最適な位置や蓄放電容量について議論する.

キーワード: マイクログリッド, 蓄放電, 電力, 送電ロス, 最適化

Effective Electric Power Utilization between Microgrids by Optimized Battery Location and Transmission Management

TOSHIAKI SUZUKI^{1,2,a)} YUSUKE SHOMURA¹ MASAYUKI MURATA²

Received: March 23, 2020, Accepted: October 6, 2020

Abstract: Lately, the increase of renewable energy utilization such as solar power has been promoted. However, such electric power is unstable due to the weather condition etc. Therefore, the stabilization of the electric power supply by using the battery etc. has been promoted. For example, in a local area, a microgrid that controls total power generation, energy storage, and power consumption has been attracting attention. In the microgrid, generated power is consumed inside area as much as possible. On the other hand, it is concerned in a single microgrid that the power shortage occurs according to the circumstances. Therefore, we propose interconnected microgrids that can reduce power transmission loss between microgrids by minimizing loads that are defined by multiplication of “volume of power transmission” and “transmission distance” as an objective function of a linear programming model. Optimized location and size of battery are discussed by using the proposed model.

Keywords: microgrid, battery, electric power, transmission loss, optimization

¹ 株式会社日立製作所研究開発グループ
Research & Development Group, Hitachi, Ltd., Kokubunji,
Tokyo 185-8601, Japan

² 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

^{a)} toshiaki.suzuki.cs@hitachi.com

1. はじめに

2015年9月の国連サミットで採択されたSDGs (Sustainable Development Goals) [1] では, 世界における多様な課題に対する17の開発目標を定めている. たとえば, 「安価で信頼できる持続可能な近代的エネルギーへのアクセ

セス保障」等、多数の目標が掲げられている。このような目標への対応の一環として、太陽光を利用した発電等の再生可能エネルギー利用増加が推進されている。

太陽光等を利用した発電では、天候の変動や時刻により発電される電力量が変動する。たとえば、天候が良い場合には発電量が増加するが、天候が悪い場合は発電量が減少する。そのため、安定した電力を確保するための対策が必要であり、たとえば、蓄放電装置等を用いることにより、利用可能な電力の変動を安定化する管理制御が実行されている。

発電した電力をセンサ等で計測して有効に活用するシステムとして、マイクログリッド [2] 等が研究されている。たとえば、マイクログリッドでは、ローカルエリアを対象として、発電した電力の地産地消を可能な限り推進する等の電力の有効利用が図られる。そのため、送電による電力のロス削減可能である。

しかし、単体でのローカルエリアを対象とした場合、発電不足や発電装置の故障等により、必ずしも必要な電力を確保できない場合が考えられる。そのような場合は、複数のマイクログリッド間で電力を融通することにより、必要な電力を確保する等が考えられる。このような状況を考慮した場合、複数のマイクログリッド間で電力の融通を可能とする広域接続マイクログリッド [3] が有望と考えられる。

本論文では、マイクログリッドを複数接続した広域接続マイクログリッドを対象とし、マイクログリッド間で電力を融通（取引等）する場合の送電ロスを削減する、高効率な電力利用方式を提案する。提案方式では、マイクログリッド間において「送電する電力量」と「送電距離」の積を目的関数とする線形計画問題を解くことにより、送電ロスの削減を図る。提案方式により、配備すべき複数の蓄放電機能の最適な位置や蓄放電容量について議論する。

以降の構成は、以下のとおりである。2章において関連研究について述べる。3章では、マイクログリッド間連携における課題、および対応方針について述べる。4章では、送電による電力ロスを低減させるための蓄放電装置の配置方式を提案する。5章では提案方式について評価を行い、6章では考察を述べる。7章において結論を述べる。

2. 関連研究

マイクログリッド関連の研究として、電力を相互に融通することにより、効率的な電力利用を実現する研究が多数実施されている。たとえば、マイクログリッドの制御にP2P (Peer to Peer) 型のネットワークを利用する研究 [4] が実施されている。また、通信ネットワークのアナロジーにより、電力ネットワークを管理する研究 [5] がされている。特に、分散電源および蓄放電装置のプラグ&プレイ機能を有し、かつエネルギーを共有するシステムが検討されている。

また、複数の発電側に着目して、発電の量やタイミング、および送電について適正化を図ることで、無駄を省いた効率的な運用が研究 [6] されている。そしてスマートホームにおいて、スマートメータや蓄放電機能を利用した効率的な電力利用制御 [7] ほかが多数研究されている。また、マイクログリッドが蓄放電機能を有する場合に、各マイクログリッドが他のマイクログリッド等から電力を購入することにより発生する支払いを最小化する研究 [8] も実施されている。さらに、電力の供給と需要リージョンを対象とした蓄放電機能の最適な配備 [9] や、放射状のトポロジに対して需要電力抑制を考慮した蓄放電機能の最適配備 [10] の研究が実施されている。

一方、電力のルーティングに着目した研究も多数実施されている。たとえば、ローカルエリアにおいて、グラフ理論に基づいたエネルギーのルーティング制御研究 [11] がされている。また、電力をパケット化して送電する研究 [12],[13] も実施されている。具体的には、ペイロードとしての電力に対してヘッダとフッタを付与し、ヘッダにおいて宛先を示す信号を発生させることにより、目的とする宛先へ伝送する方式が検討されている。

上記の関連研究では、電力を双方向にルーティングする研究が進められており、マイクログリッド間において容易な電力送電制御が実現される方向に発展している。また、着目している点としては、複数タイプのエネルギーに対して効率的な利用や購入のための支払額削減といった、電力の供給者や需要者の視点に立った研究が主に推進されている。

本論文では、送電制御が可能な電力ネットワークを前提とし、電力を供給可能な事業者、送電する事業者、および電力を消費する事業者間における電力融通（取引）に対して、送電にともなう電力ロスを削減するための蓄放電機能の配備位置制御や送電経路制御に着目する。各マイクログリッドにおける電力収支として、他のマイクログリッドへ電力供給が可能なマイクログリッドを管理する事業者を供給事業者、他のマイクログリッドから電力を必要とするマイクログリッドの管理事業者を需要事業者と称する。また、供給事業者と需要事業者間において電力の送電を行う事業者を、送電事業者と称する。このような設定の下、本論文では、電力の供給と需要を行う事業者間を接続する送電網において、送電事業者が蓄放電機能を装備し、時々刻々と変化する発電量と電力消費量が異なる場合において、発電した電力を一時的に蓄電し、電力が必要とされる時刻に電力供給を可能とするための制御を対象とする。特に、送電にともなう電力ロスを削減するため、「送電する電力量」と「送電距離」の積を最小化するように蓄放電機能の最適な配備位置や送電経路を決定し、効率的な電力利用を可能とする方式を提案する。

研究 [4]~[8] については、電力を効率的に利用する観点

では本論文と関連するが、蓄放電機能を最適配備することにより、効率的な電力利用を実現する点では異なる。また、研究 [11] については、送電によるロスを削減する点では本論文と関連するが、蓄放電機能により、余剰となった電力を一時的に蓄放電機能に蓄電し、電力が不足した段階において蓄電した電力を利用することにより、発電した電力を有効に利用する観点では異なる。さらに、研究 [12], [13] は、電力をバケット化して送電する研究であり、電力を扱う点では関連するが、蓄放電機能を利用した電力の有効利用の観点では異なる。一方、研究 [9], [10] については、蓄放電機能を最適に配備する観点で類似しており、類似点や相違点について、表 1 を用いて比較する。表 1 内における、a~i は、表の後段に示した評価観点を示している。

研究 [9] は、大規模な電力システム全体 (f) に対するライフサイクルコストを最小化 (g) する研究であり、送電線敷設等のコストを含めて評価しており、送電線の容量を最適化のための決定変数 (b) として扱っている。また、電力の供給点や需要点を含めて蓄放電機能を配備する構成 (d) となっている。一方、本論文では、敷設された送電線を利用した場合において、送電にともなう電力ロスを最小化するように蓄放電機能を配備するため、送電容量は制約条件 (c) としての定数 (上限値) として扱っている。そのため、研究 [9] と本論文では異なる目的および手段となっている。

研究 [10] は、単一のマイクログリッド (小規模かつ放射型接続) を対象とし、蓄放電機能に対するライフサイクルコストを最小化 (h) する研究である。そのため、蓄放電機能の設備コストや蓄放電機能による電力消費のピーク削減による運用益等を統合的に評価し、ライフサイクルコストを評価関数として最小化するように、電力の供給点を含めて蓄放電機能の最適な位置をマイクログリッド内で決定 (d) している。一方、本論文では、複数のマイクログリッドを広域接続した大規模な構成を対象 (f) としており、電力の供給と需要を行うマイクログリッド間での送電にとも

表 1 関連研究比較

Table 1 Comparison between related studies and our proposal.

	a	b	c	d	e	f	g	h	i
研究[9]	○	○		○		○	○		
研究[10]	○			○				○	
Proposal	○		○		○	○			○

- a: 蓄放電機能を最適配備する機能
- b: 送電線の容量を決定変数として設定
- c: 送電線の容量を制約条件としての定数として設定
- d: 電力の供給点や需要点を含めて蓄放電機能を配備
- e: 電力の供給点と需要点の中継点に蓄放電機能を配備
- f: 広域接続した複数のマイクログリッド等の規模を対象
- g: システム全体に対するライフサイクルコストを最小化
- h: 蓄電機能に対するライフサイクルコストを最小化
- i: 送電にともなう電力ロスを最小化

なう電力ロスを最小化 (i) するため、「送電する電力量」と「送電距離」の積を評価関数として最小化するように送電網において、指定した個数の範囲内において蓄放電機能の最適な位置を決定 (e) している。そのため、研究 [10] と本論文では異なる目的および手段となっている。

以上の比較により、研究 [9] は、発電設備や送電設備等の全体システム提供者の視点を中心として、ライフサイクルコスト最小化に資する蓄放電機能配置を算出し、研究 [10] は、蓄放電機能の提供者の視点を中心として、ライフサイクルコスト最小化に資する蓄放電機能配置を算出している。一方、本論文では、新規な点として、送電網の提供者視点で、発電した余剰電力を希望する蓄放電機能の配置数制限に従い、送電網内に配置した蓄放電機能に一次的に蓄電し、電力不足時に放電利用することで発電した電力を有効活用し、かつ送電にともなう電力ロスを最小化する位置に蓄放電機能を配置可能な方式を提案する。

3. 電力有効利用の課題と対応方針

3.1 マイクログリッド概要

図 1 に、マイクログリッドの一例を示す。本マイクログリッドは、複数の太陽光発電機器 (Photovoltaic)、電力消費機器、蓄放電機器が電力スイッチにより接続され、電力スイッチを介して他のマイクログリッドと相互接続することが可能な構成を有する。また、あるマイクログリッドにおいて発電量が消費電力量より多い場合には、電力が不足する他のマイクログリッドへ電力を供給可能である。

図 2 に、一例としての太陽光発電量変化を示す。横軸は

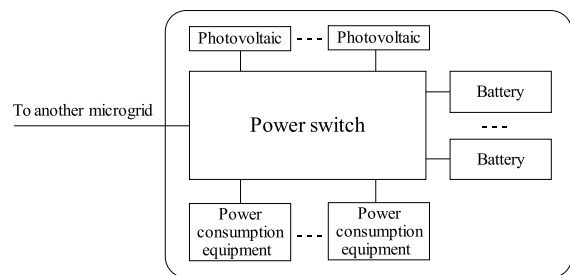


図 1 マイクログリッドの構成例
Fig. 1 Example of a microgrid.

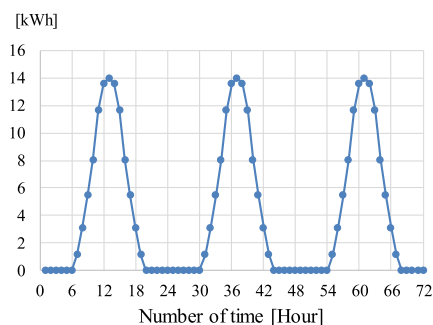


図 2 マイクログリッドにおける発電サイクル
Fig. 2 Produced power cycle in a microgrid.

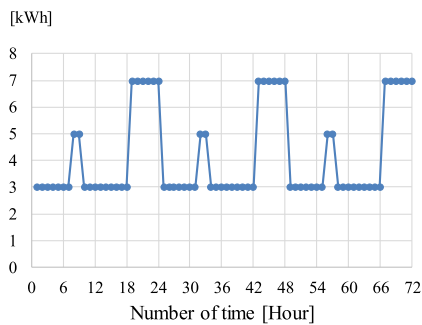


図3 マイクログリッドにおける消費電力サイクル
Fig. 3 Consumed power cycle in a microgrid.

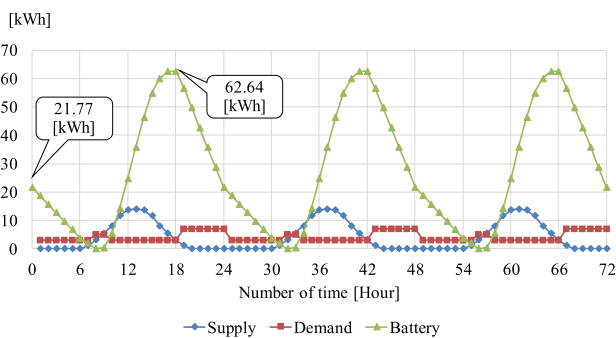


図4 需給電力量と蓄電量の関係

Fig. 4 Power relation among supply, demand and battery.

時間単位での3日間を示し、縦軸は発電の電力量 (kWh) を示している。この例では、良好な気象状況により、太陽光により発電が繰り返される状態を示している。また、図3に、各マイクログリッドにおける電力消費量の変化例を示す。発電と同様に、横軸は時間単位での3日間を示し、縦軸は消費される電力量 (kWh) を示している。この例では、出勤前に消費電力が少し増加し、帰宅後に消費電力が多く増加する消費パターンを示している。なお、発電していない時間帯における電力消費は、蓄放電機器からの電力供給により対応する。

3.2 電力有効利用の課題

図4は、図2で示した発電(図4中では、「Supply」の曲線で表示した電力供給)と図3で示した電力消費(図4中では、「Demand」の曲線で表示した電力需要)が行われる場合に、発電した電力を一時的に蓄電し、必要な時間帯において放電する場合に必要な蓄電量(図4中の「Battery」の曲線で表示した蓄電量)を示している。図中の「Supply」で示した電力供給では、太陽が出ていない時間帯では発電ができず、一方、「Demand」で示した電力需要では、変動はあるが常時電力を必要としており、初期の段階においては、電力供給することができない。そのため、初期値としての蓄電が必要であり、図4に示した例では、21.77kWhになることを示している。

一方、蓄放電機能がない場合は、電力消費が少ない昼間

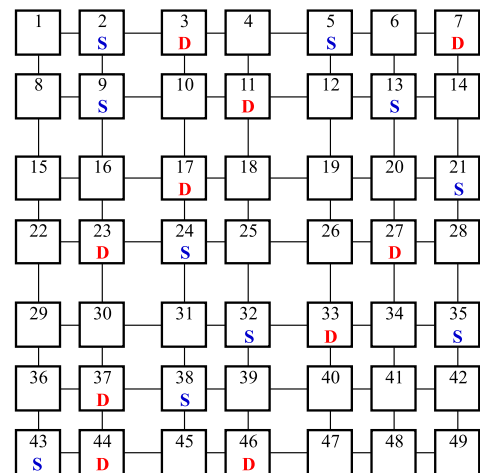


図5 広域接続マイクログリッドの例

Fig. 5 Example of wide area connected microgrids.

の時間帯に多く発電した電力は、利用されずに廃棄される。そのため、昼間の時間帯に多く発電した電力を有効活用するため、一時的に蓄電して夕方以降に発生する大量の電力消費に対応する必要がある。このような状況では、消費されない電力を一時的に蓄電するための容量が必要となり、図4の例では、その値が62.64kWhになることを示している。

以上示したように、各時間帯において、電力の供給量と需要量が一致しない場合は、蓄放電機能を利用することにより、超過する発電量を一時的に蓄電し、異なる時間帯に必要とされる電力需要に対応する必要がある。

3.3 広域接続マイクログリッドの概要と課題

図5に、広域接続マイクログリッドの一例を示す。図中において、番号1~49を付与した四角形それぞれが、図1に示したマイクログリッドに該当する構成となっている。また、図に示されるように、広域接続したマイクログリッドでは、縦横方向に7×7の計49(1~49)のマイクログリッドが格子状に接続された構成をしている。図中において文字「S」は、個々のマイクログリッドとしての電力収支において電力が過剰状態にあり、電力の供給(Supply)が可能な状態を示している。また、その供給量としては、太陽光による発電過剰を模擬し、図2に示した量を一例として用いる。一方、図中において文字「D」は、個々のマイクログリッドとしての電力収支において電力が不足状態にあり、電力を要求(Demand)する状態を示している。また、その需要量としては、図3に示した量を一例として用いる。なお、実際のマイクログリッドでは、発電した電力量と消費している電力量の差分が、供給可能な電力量、あるいは不足する電力量となるが、ここでは、マイクログリッド間で異なる状態にあることを模擬する例として、図2と図3に示した発電と電力消費のパターンを用いる。一方、図中において、「S」や「D」の文字の記載のないマイクロ

グリッドは、マイクログリッド内での電力収支として過不足がない状態を示している。

上記説明した広域接続マイクログリッドを構成する各マイクログリッドに対し、各時間帯において電力の供給量と需要量が一致しない場合は、蓄放電機能を利用し、超過する発電量を一時的に蓄電し、異なる時間帯に必要とされる電力需要に対応する必要がある。そのため、広域接続マイクログリッド内に蓄放電機能を配備する必要があるが、適切な位置に蓄放電機能を配備しない場合、電力を需給するマイクログリッド間の最短経路ではない経路に存在するマイクログリッドに一時的に蓄電されて送電されるため、送電距離が増加し、送電による電力ロスが増加するという課題がある。

本論文では、上記に示したように、発電した電力を一時的に蓄電して異なる時間帯に利用するための蓄放電機能の最適な配備、蓄放電容量、送電経路を決定し、送電ロスを削減可能な方式を提案することを目的とする。具体的には、図5に示した広域接続マイクログリッドにおいて、電力の需給を行わないマイクログリッド（中継用マイクログリッドと称する）を送電事業者が活用し、必要に応じて最適な容量の蓄放電機能を配備することにより、送電ロスを削減することを目的とする。

3.4 送電経路の決定と蓄放電機能の配備方針

本論文では、蓄放電機能を配備し、送電に対する電力ロスを削減することを目的としている。ここで、送電による電力ロスは、送電する電力量や送電距離に対して比例的に増加 [14] すると仮定する。そこで、評価のための目的関数として、マイクログリッド間で送受信される「電力量 (kWh)」と「送電距離 (km)」の積（送電負荷と称する）を規定する。提案手法として、最適な送電経路の算出では、電力供給側のマイクログリッドから供給されたすべての電力が、蓄放電機能に蓄電、あるいは需要側マイクログリッドで消費される場合に対して、送電負荷が最小となるように、マイクログリッド間で送電される電力量や送電経路を決定する。

また、提案手法として、蓄放電機能の最適な配備においては、指定された蓄放電機能の配備数や容量の制限に基づき、送電負荷を最小化する評価期間内において送受信される総電力量に対して、送電負荷を最小化するように探索を行い、最適な配備位置を決定する。

4. 送電負荷削減および蓄放電の最適配備提案

4.1 評価モデルの定義

本論文では、図5に示したように、複数のマイクログリッドが接続された構成を対象として、電力を送電する中継用マイクログリッドに蓄放電機能を配備し、送電にともなう電力ロスを最小化することを目的としている。この問

題を解決するために、本論文では、新たに、1) 中継用のマイクログリッドに蓄放電機能を配備するか否かの決定変数、2) 蓄放電機能への蓄電量を制御する決定変数、3) マイクログリッド間の送電量を制御する決定変数を設定し、問題解法のための定式化を行った。

定式化においては、電力の需給を行うマイクログリッドを識別する必要がある。また、ある時刻に発電された電力を一時的に蓄電して電力が不足したときに放電して利用するための蓄放電機能を配備するマイクログリッドや時刻を識別する必要がある。さらに、送電容量は有限であり、また、送電による電力ロスは、送電する電力量や送電距離に依存するため、マイクログリッド間で送電可能な電力量上限値や、送電距離を規定する必要がある。そして、あるマイクログリッドにより発電された電力を送電し、他のマイクログリッドにおいて電力消費を行うプロセスにおいて、送電にともなう電力ロスを評価するためには、マイクログリッドにおける発電量と消費電力量の変動を規定する必要がある。余剰に発電された電力を一時的に蓄放電機能に蓄電し、発電不足となった段階で放電して利用するにあたり、蓄放電機能の容量は有限であるため、その上限値としての容量を規定する必要がある。また、配備計画としての蓄放電機能を配備するマイクログリッドの総数を規定する必要がある。さらに、発電前に消費される電力を供給するための蓄電総量や、余剰に発電された電力を蓄電するための、最小限必要な蓄放電機能の容量を規定する必要がある。以上の設定を行うことによって、より現実的な問題を扱うことが可能になる。なお、その解法については、次節以降で詳述する。

表2に、具体的に定義した記号のリストを示す。 i は、マイクログリッドが N 個存在する場合において、マイクログリッドの番号を示す。 t は、評価期間を T 個のスロットに分割した場合において、時刻のスロット番号を示す。 $C(i, j)$ は、複数のマイクログリッドが相互に接続された構成において、隣接するマイクログリッド i と j 間の距離を示す。 $L(i, j)$ は、隣接するマイクログリッド i と j 間において、送電可能な電力量の上限値を示す。 $P(i, t)$ は、時刻 t において、マイクログリッド i から供給される電力量 (kWh) を示す。 $D(i, j)$ は、時刻 t において、マイクログリッド i で消費される電力量 (kWh) を示す。 $W(i)$ は、マイクログリッド i に配備した蓄放電の容量 (kWh) を示す。 M ($M < N$)は、蓄放電機能を配備したマイクログリッドの総数を示す。 V は、全体に対して発電前に消費される電力を供給するための、初期値としての総蓄電量 (kWh) を示す（後述する式 (6) 参照）。 U は、評価対象期間において余剰に発電される電力を蓄電するために最小限必要な総蓄放電容量 (kWh) を示す（後述する式 (7) 参照）。

表 2 定義した記号リスト
Table 2 List of symbols.

記号	定義
i	マイクログリッドの番号 ($i=1, \dots, N$)
t	時刻の番号 ($t=1, \dots, T$)
$C(i, j)$	隣接マイクログリッド i と j 間の距離 (km)
$L(i, j)$	隣接マイクログリッド i と j 間において、送電可能な電力量の上限値 (kWh)
$P(i, t)$	時刻 t において、マイクログリッド i から供給される電力量 (kWh)
$D(i, t)$	時刻 t において、マイクログリッド i にて消費される電力量 (kWh)
$W(i)$	マイクログリッド i に配備した蓄放電容量 (kWh)
M	蓄放電機能を配備したマイクログリッド総数 $M < N$
V	発電前に必要とされる電力を供給するための総蓄電量初期値 (kWh) (後述する式(6)参照)
U	評価対象期間において余剰に発電される電力を蓄電するための最小総蓄放電容量 (kWh) (後述する式(7)参照)

4.2 決定変数の定義

本論文では、送電にともなう電力ロスを削減するための蓄放電機能の最適な配置を決定することを目的としている。そのため、どのマイクログリッドへ蓄放電機能を配備するかの変数が必要である。また、送電にともなう電力ロスは、送電した電力量に依存するため、各時刻において、マイクログリッド間で送電する電力量を最適化するための変数が必要である。さらに、どの時刻において、発電された電力を一時的に蓄電し、また、どの時刻において蓄電した電力を放電するかを最適化を図るための変数が必要である。以上により、最適な蓄放電機能の配置、送電量、および蓄放電量を決定するための変数設定を行うことにより、蓄放電機能の配置位置と送電にともなう電力ロスを評価可能になる。

表 3 に、具体的に設定した決定変数のリストを示す。 $Q(i, j, t)$ は、時刻 t において、マイクログリッド i から j へ送電される電力量 (kWh) を示し、後述する最適化問題で決定される。 $B(i, t)$ は、時刻 t において、マイクログリッド i の蓄放電機能に残存する電力量 (kWh) を示し、後述する最適化問題で決定される。また、 $\delta(i)$ は、マイクログリッド i において、蓄放電機能の配備がある場合は 1 の値が、そして配備がない場合は 0 の値が、後述する最適化問題で決定される。なお、 $B(i, t)$ と $\delta(i)$ における i は、電力の需給を行わない中継用マイクログリッドの番号を示す。

表 3 決定変数リスト
Table 3 List of decision variables.

変数	定義
$Q(i, j, t)$	時刻 t において、マイクログリッド i から j へ送電される電力量 (kWh)
$B(i, t)$	時刻 t において、マイクログリッド i の蓄放電機能に残存する電力量 (kWh)
$\delta(i)$	中継用マイクログリッド i において、蓄放電機能の配備が有 : 1, 無 : 0

4.3 目的関数と制約条件

提案システムでは、前章で説明したように、「電力量 (kWh)」と「送電距離 (km)」の積 (送電負荷) を最小化することを目的としており、線形計画問題として定式化して評価する。送電にともなう電力ロスは、送電量と送電距離に大きく依存する。そのため、送電負荷 (全マイクログリッド間で送受信される電力量と送電した距離の積) を評価する必要がある。以下に設定した目的関数を示す。 $C(i, j)$ は、電力を送受信する隣接マイクログリッド間の距離を表し、 $Q(i, j, t)$ は、送電される電力量を表す。

$$\text{Minimize } \sum_{t=1}^T \sum_{i=1, i \neq j}^N C(i, j) Q(i, j, t) \quad (1)$$

以下に制約条件を記載する。

1) 電力収支条件：すべての時刻において、あるマイクログリッドに流入あるいは発電される電力量は、流出する電力量あるいは消費される電力量と、蓄放電される電力量の総和と等しい必要がある。時刻 t において、マイクログリッド i における電力収支は、隣接するマイクログリッド k から流入する電力量 $Q(k, i, t)$ とマイクログリッド k へ流出する電力量 $Q(i, k, t)$ 、および蓄電量の変化量の和に等しい。また、電力を供給するマイクログリッドでは $(-1) * P(i, t)$ に等しく、電力を必要とするマイクログリッドでは $D(i, t)$ に等しい。さらに、電力の需給を行わない中継用マイクログリッドでは、蓄放電機能に蓄電することで、電力収支が 0 となる。

$$\begin{aligned} \sum_k Q(k, i, t) - \sum_k Q(i, k, t) + B(i, t-1) - B(i, t) \\ = D(i, t) - P(i, t) \end{aligned} \quad (2)$$

2) 送電量条件：マイクログリッド間において送電される電力量は、送電容量の上限値を超えることができない。時刻 t において、マイクログリッド i から j へ送電する電力量 $Q(i, j, t)$ が、送電可能な上限値 $L(i, j)$ 以下である。

$$0 \leq Q(i, j, t) \leq L(i, j) \quad (3)$$

3) 蓄放電機能数条件：蓄放電機能の配備計画として設定した配備数の範囲内において、最適な蓄放電機能を配備する必要がある。蓄放電機能を配備する中継用マイクログリッ

ド数が、指定された数 M 以下である。

$$\sum_{i=1}^N \delta(i) \leq M \quad (4)$$

4) 蓄放電量条件：蓄放電機能を配備したマイクログリッドにおいてのみ、蓄放電機能の上限値以内で蓄電が可能である。時刻 t において、蓄放電機能を有するマイクログリッド i に蓄電された電力量 $B(i, t)$ が、指定された容量 $W(i)\delta(i)$ 以下である。

$$0 \leq B(i, t) \leq W(i)\delta(i) \quad (5)$$

5) 蓄電量の初期値条件：発電を開始していない時刻帯において必要とされる電力を供給するため、あらかじめ必要最小限の電力を蓄電しておく必要がある。発電する前に必要とされる電力を供給するための蓄電量 $B(i, 0)$ の和が、指定された電力量初期値 V (kWh) に等しい値である。

$$\sum_{i=1}^N B(i, 0) = V \quad (6)$$

6) 蓄放電機能の容量条件：ある時刻に発電された余剰な電力を廃棄せず蓄電するためには、必要最小限以上の蓄放電容量を全体として配備する必要がある。配備される蓄放電機能の総容量が、評価対象期間において余剰に発電されるすべての電力を一時的に蓄電保持するために必要な最小限の蓄放電容量 U (kWh) 以上である。

$$\sum_{i=1}^N W(i)\delta(i) \geq U \quad (7)$$

4.4 蓄放電機能の最適な配備方式の提案

本論文では、電力が余剰となるマイクログリッドから電力を供給し、他のマイクログリッドにおいて電力を消費するにあたり、発電量と消費電力量が各時刻において一致していない場合に、余剰となった電力を一時的に蓄放電機能に蓄電し、電力が不足した場合に放電して利用する電力需給において、送電にともなう電力ロスを最小化しようとしている。本目的に対して、適切な位置に蓄放電機能を配備しない場合、送電距離が増加して送電にともなう電力ロスが増加するため、最適な位置に蓄放電機能を配備する必要がある。

そこで、本論文では、前節に示したように、送電にともなう電力ロスは、送電する電力量と送電した距離に大きく依存するため、「送電した電力量 (kWh)」と「送電した距離 (km)」の積 (送電負荷) を評価関数として規定し、最小化するための蓄放電機能の最適な配備方式を提案する。具体的には、新規として、1) あるマイクログリッドに対して蓄放電機能を配備するか否かに対する有無を示す決定変数、2) どの時刻においてどれだけの電力を蓄電すべきか放電すべきかを制御する決定変数、3) マイクログリッド間を送電する電力量を規定する決定変数を設定し、評価関数としての送電負荷を最小化するための蓄放電機能を指定

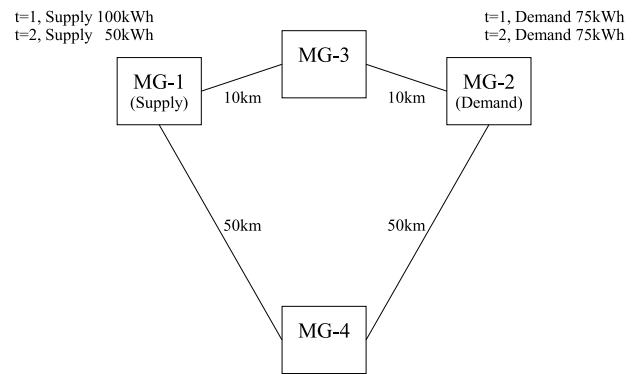


図 6 小規模な複数マイクログリッド接続例
Fig. 6 Example of small interconnected microgrids.

した個数の範囲内において最適な配備位置の決定方式を提案する。

図 6 に、提案手法における解探索の概要を説明するための小規模な広域接続マイクログリッドの例を示す。ここで、簡単な例として、 $t = 1$ において、マイクログリッド 1 (MG-1) で 100 kWh の発電が行われ、MG-2 において 75 kWh の電力消費が行われることを仮定する。また、 $t = 2$ において、MG-1 において 50 kWh の発電が行われ、MG-2 において 75 kWh の電力消費が行われることを仮定する。また、MG-1 と MG-3 間、および MG-3 と MG-2 間の距離をそれぞれ 10 km、MG-1 と MG-4 間、および MG-4 と MG-2 間の距離をそれぞれ 50 km と仮定する。さらに、各 MG 間を接続する送電網の送電容量として 100 kWh を仮定する。

本条件においては、 $t = 1$ において 100 kWh 発電されるが、75 kWh しか電力消費されない。そのため、25 kWh を廃棄しないためには、一時的に 25 kWh を蓄電保持する必要がある。また、 $t = 2$ においては、50 kWh が発電されるが、75 kWh の電力消費が想定されており、25 kWh が不足する。ここで、 $t = 1$ において蓄電保持された 25 kWh を放電して利用することにより、結果として 75 kWh の電力消費に対応することが可能となる。

この蓄放電を行う場合、送電網上にある MG-3、あるいは MG-4 において、蓄放電機能を装備して対応することが考えられる。これらの設定条件において、MG-1 から MG-2 へ電力を供給するパターンとして多数考えられるが、代表として 2 パターンを比較する。

第 1 のパターンでは、 $t = 1$ において、MG-1 から MG-3 へ 100 kWh を 10 km 送電し、MG-3 において 25 kWh を蓄電し、75 kWh を MG-2 に 10 km 送電することにより、MG-2 において 75 kWh の電力消費を行う。また、 $t = 2$ において、MG-1 から MG-3 へ 50 kWh を 10 km 送電し、MG-3 では、蓄電してあった 25 kWh を放電し、合計として 75 kWh を MG-2 へ 10 km 送電することにより、MG-2 では 75 kWh の電力消費を行う。

第2のパターンでは、第1のパターンで実施した蓄放電機能をMG-3ではなくMG-4に配備することにより、 $t=1$ に余剰に発電された電力を一時的に蓄電し、 $t=2$ において放電することにより、不足する電力を補う。

上記の2パターンに対して、MG-3,あるいはMG-4のいずれに蓄放電機能を配備すべかを決定するため、前節で規定した目的関数を用いる。また、最適な配備位置を決定するにあたり、MG-3,あるいはMG-4に蓄放電機能を配備して送電する場合に、前節で規定した制約条件を満たしているか否かが評価される。以上のプロセスに対して、配備すべき蓄放電機能の配備位置や蓄放電の容量、およびMG間の送電量を決定変数として、指定された条件の範囲内において変更して評価し、目的関数を最小化する解を探索する。

5. 提案方式の評価と結果

5.1 評価概要

評価では、第1に、送電にともなう電力ロスを最小化するため、広域接続マイクログリッドへ配備する蓄放電機能数と送電負荷の関係、および配備する蓄放電容量と送電負荷の関係を明らかにする。送電にともなう電力ロスを削減するためには、3.4節の仮定[14]（送電する電力量や送電距離に対して比例）より、送電量と送電距離の積（送電負荷）を最小化する必要がある。そのため、本評価では、広域接続マイクログリッドへ配備する蓄放電機能数 M と蓄放電容量 $W(i)$ をパラメータとして変更し、それぞれの場合における「電力量 (kWh)」と「送電距離 (km)」の積の最小値を比較し、蓄放電機能を配備すべきマイクログリッド数と、装備すべき蓄放電機能の容量を評価する。なお、課題の項で説明したように、蓄放電機能の配備可能な位置として、中継用マイクログリッドを対象とする。

第2に、配備する蓄放電機能の容量を全体として一定にした場合において、蓄放電機能の配備数と蓄放電容量の各組合せと、送電負荷との関係を明らかにする。具体的には、全体としての蓄放電容量が一定の場合において、容量の小さな蓄放電機能を多数配備する場合と、容量の大きな蓄放電機能を少数配備する場合に対して、いずれの場合の方が送電負荷を削減する効果が高いかを明らかにする。そのため、蓄放電機能の配備数 M と蓄放電容量 $W(i)$ の積を固定し、配備すべき蓄放電機能数と蓄放電容量の組合せを変更して送電負荷の変動を評価する。

第3に、他の手法と比較することにより、提案方式の優位性を示す。比較する候補としては、関連研究[4]~[13]があげられるが、2章において説明したように、蓄放電機能の配備関連性から研究[8],[9]が考えられる。しかし、2章において詳述したように、本論文の目的や手段と比較した場合、研究[8],[9]とも目的や手段が異なり、また特に目的関数や制約条件が異なるため、同一の指標で比較すること

表4 定義した記号の設定値リスト
Table 4 Value of each defined symbol.

定数	設定値
i	1, ..., 49
t	1, ..., 56
$C(i,j)$	図7に示したようにマイクログリッド間の距離(10km/50km)を設定
$L(i,j)$	1,000 (kWh)
$P(i,t)$	$i=2, 5, 9, 13, 21, 24, 32, 35, 38, 43$ (10カ所)に対して、図2に示した発電量を設定 (kWh)
$D(i,t)$	$i=3, 7, 11, 17, 23, 27, 33, 37, 44, 46$ (10カ所)に対して、図3に示した消費電力量を設定 (kWh)
$W(i)$	評価1: 100~250 (kWh) 評価2: 31.32, 41.76, 62.64, 125.28, 313.2 (kWh)
M	評価1: 5~10 評価2: 20, 15, 10, 5, 2
V	217.7 (kWh)
U	626.4 (kWh)

は困難である。そこで、比較する手法としては、k-means法を用いて蓄放電機能を配備する手法を比較対象とする。

k-means法は、教師なし学習により、与えられたデータ群を指定された数のグループに分類するクラスタ分割手法を提供する。この手法を活用することにより、電力の供給、あるいは需要を行うすべてのマイクログリッドを対象として、配備予定の蓄放電機能数に合わせてクラスタ分割することが可能となる。たとえば、電力を供給するマイクログリッドが10カ所、また、需要状態となるマイクログリッドが10カ所の場合、合計した20カ所のマイクログリッドを対象となる。ここで、5カ所に蓄放電機能を配備する場合、20カ所のマイクログリッドを、5つのクラスタに分割する。そして、各クラスタの中心を求め、その中心から最短距離にあり、かつ蓄放電機能を配備可能な中継用マイクログリッドへ蓄放電機能を配備する。このように蓄放電機能を配備することにより、電力を供給するマイクログリッドから蓄放電機能を経由して需要側のマイクログリッドへ送電する場合において、クラスタ内における送電距離を削減可能となる。

一方、提案方式では、マイクログリッド間で送受信される電力量と経路長を正確に評価し、最適化する手法となっている。そこで、提案方式とk-means法による手法とを比較し、提案手法の優位性を評価する。

5.2 評価モデルの設定

表4に、定義した記号に対する設定値リストを示す。評価を実施する広域接続マイクログリッドとして、21のリージョン[9]や34ノードのマイクログリッド[10]で評価を行っている研究、および国内の都道府県数が47であること

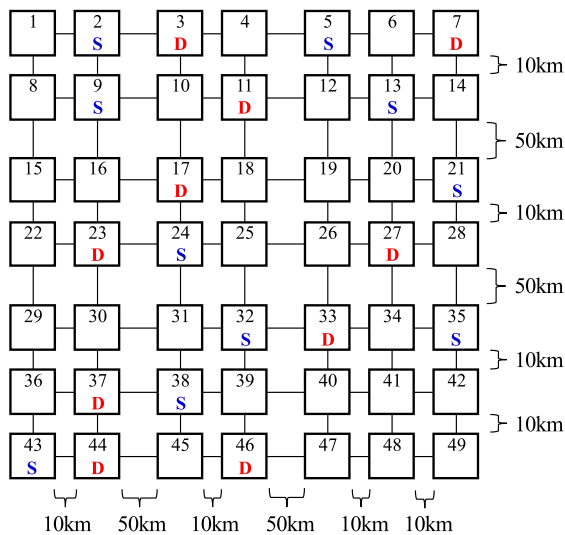


図 7 マイクログリッド間の距離設定
Fig. 7 Distance between microgrids.

を考慮し、図 5 に示した構成を用いる。すなわち、配備するマイクログリッド数 N を 49 (1~49) とする。また、各マイクログリッドにおいて、電力の供給が可能なマイクログリッドと、電力の需要状態となるマイクログリッドを、それぞれ 10 カ所に設定する。評価する期間として、図 4 に示した蓄電量のサイクルにおいて、周期性の検証が可能な期間、すなわち蓄電量が 0 となる 2 周期目である $t = 56$ までを対象として評価する。マイクログリッド間の距離 $C(i, j)$ としては、図 7 に示したように、10 km, あるいは 50 km の距離の設定を用いる。送電量の上限值 $L(i, j)$ としては、本評価では十分な送電能力があるとして、1,000 kWh と設定する。供給可能な電力量 $P(i, t)$ として、10 カ所のマイクログリッドから電力供給を行い、それぞれの供給量として、すべて図 2 に示した発電量を用いる。また、需要電力量 $D(i, t)$ として、10 カ所のマイクログリッドにおいて需要設定を行い、それぞれの需要量として、すべて図 3 に示した需要量を用いる。なお、需給量の値としては、実際には予測した値を用いるが、本評価では、予測された値として、図 2 および図 3 の値を用いる。マイクログリッドに配備する蓄放電の容量 $W(i)$ は、容量に対する送電負荷を評価する場合 (評価 1 : 5.3.1 項参照) において、100~250 kWh の間に設定した。また、配備数 M は、5~10 カ所の範囲で設定した。一方、蓄放電容量が一定において、送電負荷を評価する場合 (評価 2 : 5.3.2, 5.3.3 項参照) では、最小限必要な蓄放電の容量 U (後述する 626.4 kWh) を考慮し、蓄放電容量 $W(i)$ と配備数 M の組合せとして、(31.32, 20) (41.76, 15) (62.64, 10) (125.28, 5) (313.2, 2) と設定する。蓄放電機能が最初に蓄電しておく必要のある電力量 V は、需給を行うマイクログリッドをそれぞれ 10 カ所に設定しており、図 4 で示した初期値としての必要蓄電量 (21.77 kWh) の 10 倍である 217.7 kWh と設定する。

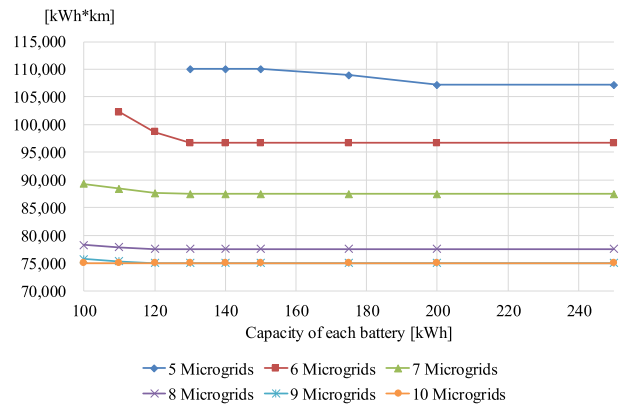


図 8 蓄放電容量と配備数に対する送電負荷評価
Fig. 8 Transmission load evaluation by changing capacity and number of microgrids.

また、評価対象期間において余剰に発電されるすべての電力を一時的に蓄電保持するために必要な最小総蓄電容量 U は、需給を行うマイクログリッドをそれぞれ 10 カ所に設定しており、図 4 で示した必要蓄放電容量 (62.64 kWh) の 10 倍である 626.4 kWh とする。

5.3 評価結果

5.3.1 蓄放電容量と蓄放電配備数に対する送電負荷評価結果

図 8 に、蓄放電機能を配備するマイクログリッド数と配備する蓄放電容量に対する送電負荷の評価結果を示す。広域接続マイクログリッド内に複数配備する蓄放電機能として、本評価では同一の上限容量を用い、100 kWh~250 kWh の間に設定して評価を行った。また、蓄放電機能の配備数として、5~10 カ所の間に設定して評価を行った。図中において描かれていない領域、たとえば、100 kWh の容量で 5 カ所の中継用マイクログリッドに配備する場合は、全体としての蓄放電容量が不足し、発電される全電力量を蓄電できないため、最適値計算不可となり、図示されていない。評価結果としては、図に示されるように、蓄放電機能を配備する中継用マイクログリッド数が少ない場合、送電負荷が非常に高いことが分かる。また、個々の蓄放電容量を必要以上に大きくしても送電負荷が減少しないことが分かる。電力の供給と需要を行うマイクログリッド数が、それぞれ 10 カ所の本評価においては、8~10 カ所程度に蓄放電機能を配備すると、送電負荷が低く抑えられるという結果を得た。なお、それぞれの送電負荷の算出時間は、約 10 分程度であった。

本評価では、蓄放電機能の配備数 (マイクログリッド数) と個々の蓄放電機能の容量を変えて評価しており、送電にともなう電力ロス (送電負荷) を削減するための、最適な蓄放電機能配備数や蓄放電機能の容量を評価可能となっている。具体的には、第 1 の観点として、配備する蓄放電機能の個々の容量が同じ場合に、送電負荷を最小化する蓄放

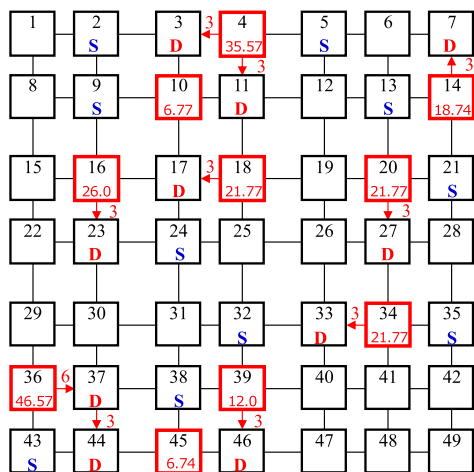


図 9 蓄放電機能 100 kWh*10 の最適配置と初期蓄電量

Fig. 9 Optimized location and initially stored power for 10 batteries with 100 kWh capacity.

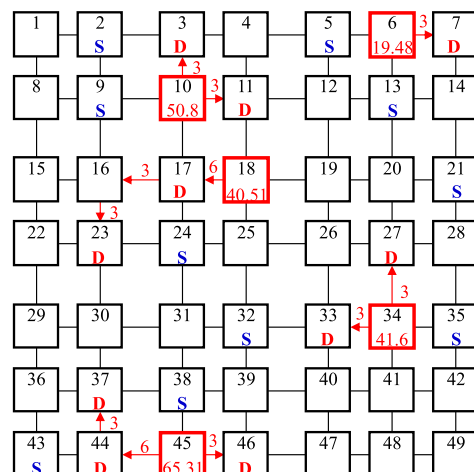


図 11 蓄放電機能 200 kWh*5 の最適配置と初期蓄電量

Fig. 11 Optimized location and initially stored power for 5 batteries with 200 kWh capacity.

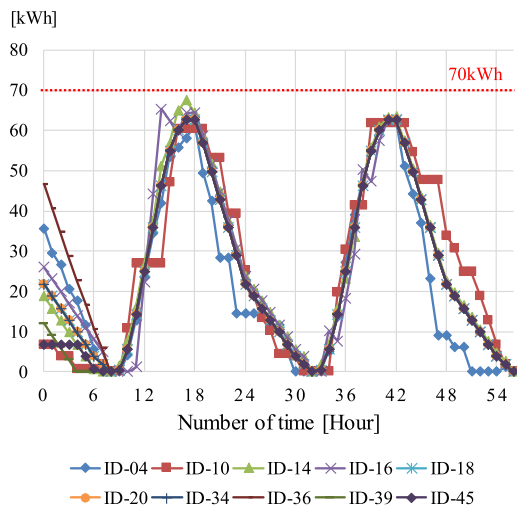


図 10 蓄放電機能 10 カ所配備における蓄電量の変化

Fig. 10 Remained power change for 10 batteries.

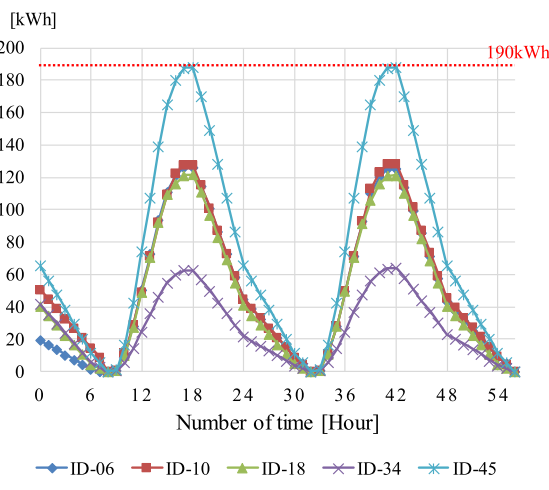


図 12 蓄放電機能 5 カ所配備における蓄電量の変化

Fig. 12 Remained power change for 5 batteries.

電機能の配備マイクログリッド数を評価可能となっている。また、第2の観点として、蓄放電機能を配備するマイクログリッド数が同じ場合に、送電負荷を最小化する蓄放電機能の容量を評価可能となっている。本評価での条件下では、容量が 100 kWh の蓄放電機能を 10 カ所に配備する場合が最良であることが確認された。

蓄放電機能配備の一例として、100 kWh の蓄放電機能を 10 カ所に配備する場合の最適配置と、初期値として必要な蓄電量の評価結果を、図 9 に示す。また、各蓄放電機能における蓄電量の変化を、図 10 に示す。

図 9 において、赤色太枠で四角表示したマイクログリッドが示すように、電力の需給を行わない中継用マイクログリッドにおいて、条件として設定したように 10 カ所 (4, 10, 14, 16, 18, 20, 34, 36, 39, 45) に蓄放電機能が配備されている。また、初期値としての総蓄電量においても、条件として設定した 217.7 kWh (赤枠内数値の積算値) が配備されている。さらに、図 9 中の赤矢印では、一例と

して $t=1$ において蓄放電機能を有する中継用マイクログリッドから、電力を必要とするマイクログリッドへの送電経路と送電量を示している。これにより、電力の供給側マイクログリッドで発電が行われていない時刻において、蓄放電機能により電力が供給されていることが確認された。

図 10 より、配備した蓄放電機能では、過剰に発電された電力が一時的に蓄電され、発電量が不足した段階で放電する動作が確認された。また、時刻 $t=8, 32, 56$ において、蓄電と放電を行った後に蓄電量が 0 を繰り返しており、過不足のない周期的な電力の蓄電と放電動作が確認された。さらに、本評価では蓄放電容量の上限値として 100 kWh に設定したが、10 カ所に配備する場合は、70 kWh 程度の容量を装備すればよいことが明らかとなった。

また、蓄放電機能の別の配備例として、200 kWh の蓄放電機能を 5 カ所に配備する場合の最適配置と、初期値として必要な蓄電量の評価結果を、図 11 に示す。また、各蓄放電機能における蓄電量の変化を、図 12 に示す。

図 11 において、赤色太枠で四角表示したマイクログリッドが示すように、電力の需給を行わない中継用マイクログリッドにおいて、条件として設定したように5カ所(6, 10, 18, 34, 45)に蓄放電機能が配備されている。また、初期値としての総蓄電量においても、条件として設定した217.7kWh(赤枠内数値の積算値)が配備されている。図9同様に、図11中の赤矢印では、一例として $t=1$ において蓄放電機能を有する中継用マイクログリッドから、電力を必要とするマイクログリッドへの送電経路と送電量を示しており、発電がない状態において、蓄放電機能により電力が供給されていることが確認された。

図12より、図10と同様に、配備した蓄放電機能では、過剰に発電された電力が一時的に蓄電され、発電量が不足した段階で放電する動作が確認された。また、時刻 $t=8, 32, 56$ において、蓄電と放電を行った後に蓄電量が0を繰り返しており、過不足のない周期的な電力の蓄電と放電動作が、確認された。さらに、本評価では蓄放電容量の上限値として200kWhに設定したが、5カ所に配備する場合は、最大で190kWh程度の容量が必要であり、その他の蓄放電機能では、それ以下の容量で対応が可能となった。

5.3.2 蓄放電機能数と蓄放電容量の積を一定とした場合の送電負荷評価結果

図13に、配備する蓄放電容量と配備数との組合せに対する送電負荷の評価結果を示す。本評価では、配備する蓄放電機能の容量と配置数の積の値として、表4で示したように、最低限必要な蓄放電容量である626.4kWhに対して比較評価した。評価結果より、蓄放電機能を10カ所の中継用マイクログリッドへ配備する場合、送電負荷が最小である75,053 kWh*kmとなった。また、蓄放電機能を20カ所、あるいは15カ所に配備した場合は、10カ所に配備した場合を基準として、それぞれ送電負荷が8%, 15%増加している。一方、蓄放電機能を5カ所、あるいは2カ所に配備した場合は、10カ所に配備した場合を基準として、それぞれ送電負荷が47%, 135%増加した結果となった。

本評価では、配備する蓄放電機能の全容量を一定として、個々の蓄放電機能数と蓄放電容量の組合せを変えて評価しており、全体として同容量の蓄放電機能を配備する場合の、蓄放電機能数と蓄放電容量の組合せと、送電負荷の関係を明らかにすることが可能となっている。本評価結果では、62.64kWhの蓄放電機能を10カ所に配備する場合が最適な結果となることが確認された。

5.3.3 蓄放電機能の最適配置(提案方式)とk-means法活用手法との比較評価結果

図14に、提案方式としての蓄放電機能を最適配備した場合と、k-means法を活用した場合の送電負荷の比較評価結果を示す。本評価では、図13の評価と同様に、蓄放電機能の配備容量と配備数の積の値が、最低限必要な蓄放電

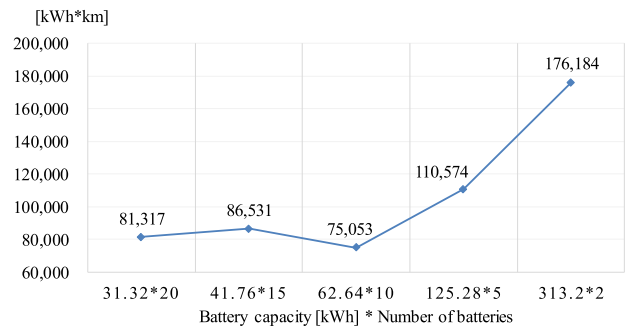


図 13 蓄放電容量一定での送電負荷評価

Fig. 13 Transmission load evaluation with same amount of battery.

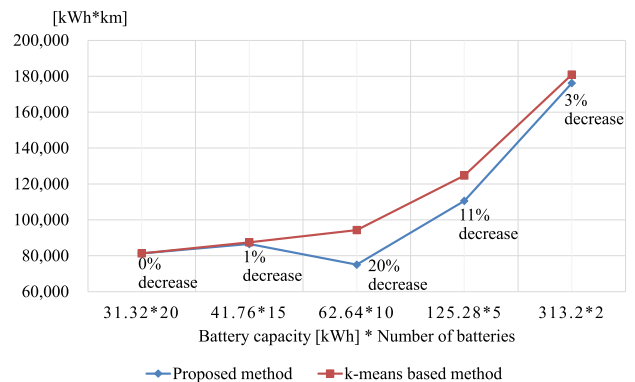


図 14 提案手法と k-means 法の活用手法との送電負荷評価

Fig. 14 Transmission load comparison between proposed method and k-means based method.

容量である626.4kWhに対して比較評価した。また、図中の「Proposed method」で示した評価結果は、図13の評価結果と同一である。図14の結果より、配備する蓄放電機能数が少ない場合における送電負荷の評価において、提案方式は、k-means法を活用する手法より、優位な結果を得た。特に、蓄放電機能を10カ所に配備し、送電負荷が最小となる提案方式の場合、k-means法を活用する手法と比較し、送電負荷が20%改善の優位な結果となった。

送電にともなう電力ロスは、送電量と送電距離に依存する。そのため、送電距離に着目したk-meansを活用した手法と、送電量と送電距離の双方に着目した提案手法とを比較している。その結果、今回の評価として送電ロス削減効果が最大となる蓄放電機能を10カ所に配備する場合において、提案方式は、k-means法を活用した手法に対して20%の改善となっており、送電量と送電距離の双方に着目して送電ロスを削減する提案手法の優位性が確認された。

6. 考察

今回の評価実験では、基本的特性を調査するため、電力の供給量や需要量等、すべて同一としている。しかし、そのような場合においても、配備する蓄放電機能数が極端に少ない場合や、適切でない位置に蓄放電機能を配備する場

合は、送電にともなう電力ロス（送電負荷）が増加するといった特性を明らかにしたと考えられる。その結果、今回の定式化によって、蓄放電機能を有する広域接続マイクログリッドの設計方針についても、限定的ではあるが、一定の評価を得ることができ、この定式化の有効性を示すことができたと考えられる。今回提案した最適化解法は、様々な場合に対する評価を可能としており、各マイクログリッドにおける供給量や需要量を異なる値に設定する等、より一般的な場合に対する評価も適用可能なものとなっていると考える。

具体的な限定性等については、図 8 や図 13 の評価結果より、電力の供給と需要を行うマイクログリッド数がいずれも 10 であり、今回設定したトポロジ等の条件における評価では、蓄放電機能の配備数が 10 である場合が最良の結果となっている。配備する可能性のある蓄放電機能数は、電力の供給を行うマイクログリッドから需要側となるマイクログリッドへの経路の組合せにおいて、実際に送電が必要な経路に対して、どれだけ独立な経路が存在するかに依存すると考えられる。

たとえば、電力の供給側マイクログリッドが 2 カ所、需要側マイクログリッドが 2 カ所の場合、供給側から需要側への送電経路としては、4 経路が存在する。そして、それらの経路が独立であり、かつすべての経路に対して送電が必要な場合、各経路に対して蓄放電機能を配備（合計 4 カ所配備）することが望ましいと考えられる。このような状況では、配備する蓄放電機能数は、独立な経路数と同数必要である。

一方、経路間に交点が存在する場合は、蓄放電容量や送電の許容量に制限がなければ、その交点に対して蓄放電機能を配備することで、それぞれの経路に蓄放電機能を配備する必要がないと考えられる。必要な蓄放電の容量については、電力供給や需要の電力量や変動パターンに依存し、ある時刻に蓄電した電力を、どの時刻で放電するかにより、必要な容量が変動すると考えられる。そのため、必要な蓄放電機能数や容量を容易に見積もることは困難と考えられる。

蓄放電機能の最適な配備数、配備位置、および容量は、電力の供給や需要を行うマイクログリッド数、位置、送電する電力量パターン、送電線の許容量、および接続トポロジ等に依存する。そのため、それらの条件ごとに蓄放電機能の最適な配備数、配備位置、および容量を算出する必要がある。提案した方式を用いて、そのつど算出する必要があるが、電力の供給や需要、および接続トポロジといった多様な条件を設定することにより、蓄放電機能の最適な配備数や位置等を算出可能なことを確認した。なお、実際の運用では、電力の供給パターンや需要パターンの統計値を用いたり、あるいは予測値を用いたりして、蓄放電機能の最適な配備数や位置を算出する必要がある。

蓄放電機能の初期蓄電量や容量を算出するにあたり、広域接続したマイクログリッド全体に対する積算値として、図 4 に示したような電力の供給パターンと需要パターンに基づき、最初に蓄電しておくべき全体としての蓄電量や、過剰に発電された電力を蓄電するための最低限必要な全体としての蓄放電の容量を見積もることができると考えられる。そのため、表 4 に示したように、蓄放電機能全体としての初期状態における蓄電量下限値として V (217.7kWh) を、また、蓄放電容量全体の下限値として U (626.4kWh) を設定し、送電負荷の評価を行っている。

一方、個々の蓄放電機能が保持すべき初期の蓄電量や最適な蓄放電機能の容量は、電力の供給と需要を行うマイクログリッド数やトポロジ等に依存して均等ではなく、送電負荷の最小化計算により算出される値となる。ただし、蓄放電機能全体として保持すべき容量下限値 U が規定される場合、個別の蓄放電機能の「容量」と「個数」の積が、下限値である U 以上になる必要があり、評価すべき範囲を限定するための指標として利用可能と考えられる。なお、電力の供給、あるいは需要状態となる各マイクログリッドに対して、複数の蓄放電機能を配備することは、送電経路の増加を招く傾向となるため、蓄放電機能の配備総数としては、容量に問題がなければ、電力の供給、あるいは需要状態となる各マイクログリッドの総数を超えて配備する必要はないのではないかと考えられる。

たとえば、電力の供給側となるマイクログリッド、および需要側となるマイクログリッドそれぞれが、利用する蓄放電機能を有し、個々の蓄放電機能の容量が各送電経路に対して不足しない場合、過剰に発電された電力を一次的に蓄電して、必要なときに放電して利用が可能となるため、容量が不足しない限り、各マイクログリッドが利用する蓄放電機能を複数配備する必要がないと考えられる。蓄放電機能の具体的な個数や容量については、蓄放電機能を配備する事業者の運用管理計画に依存すると考えられる。たとえば、コストの観点や運用管理の容易さの観点等に基づき、大容量の蓄放電機能を少数配備するか、あるいは小容量の蓄放電機能を多数配備するかといった方針に依存すると考えられる。

本論文では、太陽光による発電等を行う広域接続されたマイクログリッドを対象とし、マイクログリッド間で電力を融通する場合において、送電ロスを削減するための蓄放電機能の配備位置決定等の方式を提案している。そのため、マイクログリッド間において、将来的に電力の取引等、電力の融通を行う状況を前提としている。

評価においては、送電にともなう電力ロスが、主に送電する電力量と送電距離に依存するという仮定をおき、送電負荷（送電量 × 送電距離）を指標として、目的関数を設定して最適化を図っている。なお、本評価では、配備する蓄放電機能は、同一の性能を仮定しているが、異なる性能へ

の対応拡張が可能である。一方、本論文では、マイクログリッドの構築や広域接続するための送電線の建設費等は考慮していない。そのため、本論文が提案する蓄放電機能配備や送電管理方式は、広域接続されたマイクログリッドが構成された段階を前提としている。

現在においては、単体としてのマイクログリッドが建設されている段階で、今後において、複数のマイクログリッドが広域接続され、かつマイクログリッド間で電力の融通を行う運用の高度化段階において、蓄放電機能の配備位置決定等に対して有用になると考えられる。

7. おわりに

本論文では、複数のマイクログリッドを相互に接続した広域接続マイクログリッドを対象として、電力の発電供給と需要のパターンが異なる状況において、蓄放電機能を用いることにより電力の融通（取引）を可能とし、かつ送電ロスを削減する、高効率な電力利用方式を提案した。提案方式では、複数の電力供給マイクログリッドから電力需要マイクログリッドへ送電するにあたり、「送電する電力量」と「送電距離」の積（送電負荷）を目的関数として最小化することにより、蓄放電機能を配備する電力中継用の最適なマイクログリッドを決定可能である。また同時に、蓄放電機能が装備すべき容量と最適な送電経路を算出可能となっている。提案方式の評価を行い、49のマイクログリッドが格子状（7×7）に接続されたトポロジを対象として、送電負荷を最小化する蓄放電機能の最適な配備、蓄放電容量、および送電経路の算出が可能であることを検証した。

今後は、日々や季節等により動的に変動する電力の発電供給や需要に対応し、かつ複数の評価期間を対象として最適な蓄放電機能の配備や送電経路の制御が可能のように機能拡張する予定である。また、本評価では、49のマイクログリッドが格子状に接続されたトポロジにおいて評価を行ったが、国内の市町村レベルや各家庭等がマイクログリッドに相当するような大規模な広域接続マイクログリッドへ適用する場合や、格子状ではない実際の地形に即したトポロジへの対応等、適用範囲を拡大する予定である。

参考文献

- [1] The United Nations: About the Sustainable Development Goals, available from (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>) (accessed 2020-03-23).
- [2] The U.S. Department of Energy: The U.S. Department of Energy's Microgrid Initiative, available from ([https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f32/The US Department of Energy's Microgrid Initiative.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f32/The_US_Department_of_Energy's_Microgrid_Initiative.pdf)) (accessed 2020-03-23).
- [3] Harmon, E., Ozgur, U., Cintuglu, H.M., Azevedo, D.R., Akkaya, K. and Mohammed, A.O.: The Internet of Microgrids: A Cloud-Based Framework for Wide Area Networked Microgrids, *IEEE Trans. Industrial Informatics*,

- Vol.14, No.3, pp.1262–1274 (2018).
- [4] Eger, K., Gerdes, C. and Öztunali, S.: Towards P2P Technologies for the Control of Electrical Power Systems, *8th International Conf. Peer-to-Peer Computing (P2P'08)*, pp.180–181 (2008).
- [5] Huang, Q.A., Crow, L.M., Heydt, T.G., Zheng, P.J. and Dale, J.S.: The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System: The Energy Internet, *Proc. IEEE*, Vol.99, No.1, pp.133–148 (2011).
- [6] Sun, Q., Han, R., Zhang, H., Zhou, J. and Guerrero, M.J.: A Multiagent-Based Consensus Algorithm for Distributed Coordinated Control of Distributed Generators in the Energy Internet, *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol.6, No.6, pp.3006–3019 (2015).
- [7] Gentile, U., Mazzocca, N., Nardone, R. and Marrone, S.: A Cost-Energy Trade-Off Model in Smart Energy Grids, *9th International Conf. P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing*, pp.394–399 (2014).
- [8] Hou, W., Tian, G., Guo, L., Wang, X., Zhang, X. and Ning, Z.: Cooperative Mechanism for Energy Transportation and Storage in Internet of Energy, *IEEE Access*, Vol.5, pp.1363–1375 (2017).
- [9] Bussar, C. et al.: Optimal allocation and capacity of energy storage systems in a future European power system with 100% renewable energy generation, *Energy Procedia*, Vol.46, pp.40–47 (2014).
- [10] Zhuang, J., Shen, G., Yu, J., Xiang, T. and Wang, X.: Micro-grid Energy Storage Location and Sizing Optimization Method Based on Demand Response, *2016 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)*, pp.517–520 (2016).
- [11] Wang, R., Wu, J., Qian, Z., Lin, Z. and He, X.: A Graph Theory Based Energy Routing Algorithm in Energy Local Area Network, *IEEE Trans. Industrial Informatics*, Vol.13, No.6, pp.3275–3285 (2017).
- [12] Takahashi, R., Tashiro, K. and Hikiyama, T.: Router for Power Packet Distribution Network: Design and Experimental Verification, *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol.6, No.2, pp.618–626 (2015).
- [13] Zhang, H., Song, L., Li, Y. and Poor, V.H.: Peer-to-Peer Packet Dispatching for Multi-Router Local Area Packetized Power Networks, *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol.10, No.5, pp.5748–5758 (2019).
- [14] 経済産業省中国経済産業局：第3章 新エネルギー導入に向けた取り組みと課題，入手先 (https://www.chugoku.meti.go.jp/policy/seisaku/energy/research/pdf/h21_koikiblock_honpen_07.pdf) (参照 2020-03-23).



鈴木 敏明 (正会員)

1990年東京理科大学理工学部卒業。1992年同大学大学院修士課程修了。同年(株)日立製作所入社。以来、臨場感映像通信システム、省電力クラウドシステム、モバイルネットワーク管理、電力ネットワークシステムの研究に従事。電子情報通信学会会員。



正村 雄介

2001年早稲田大学理工学部卒業.
2003年同大学大学院修士課程修了.
同年(株)日立製作所入社. 2011年
筑波大学(工学)博士号取得. ネット
ワークのトラフィック解析技術の研究

を経て, 2019年より電力ネットワー
クシステムの研究に従事.



村田 正幸

1982年大阪大学基礎工学部情報工学
科卒業. 1984年同大学大学院博士前
期課程修了. 同年日本アイ・ビー・エ
ム(株)入社. 同社東京基礎研究所を
経て, 1987年大阪大学大型計算機セン
ター助手. 1989年同大学基礎工学部

助手. 1991年同講師. 1992年同助教授. 1999年同教授.
2000年大阪大学サイバーメディアセンター教授. 現在, 大
阪大学大学院情報科学研究科教授. 工学博士. システムの
モデル化と性能評価, 情報ネットワークアーキテクチャ等
の研究に従事. IEEE, ACM 各会員.