

# カラー管理された電力需給における高効率な電力利用を可能とする充放電および送電管理方式

鈴木 敏明<sup>1,a)</sup> 村田 正幸<sup>2</sup>

受付日 2021年3月26日, 採録日 2021年10月8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, 発電, 充放電, 電力消費を統合的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が想定され, 複数のマイクログリッドが電力を必要に応じて融通するマイクログリッド連携が検討されている。ただし, 再生可能エネルギーにより発電された電力利用や充放電利用には, 地域的な差があるため, 送電やさらに充放電等によるコストを考慮することが必須である。本論文では, 数理計画問題を解くことにより, マイクログリッド連携による広域接続マイクログリッドにおける送電および充放電による電力ロスを最小化する, 高効率な電力利用方式を提案する。提案方式では, 再生可能エネルギーによる発電とそれ以外の発電を区別した電力のカラー管理を行い, 再生可能エネルギーによる電力消費の目標比率を管理可能とする。また, 提案方式の評価を通して, 充放電機能の最適な配備や送電および充放電について議論する。

**キーワード:** カラー管理された電力, マイクログリッド, 充放電, 電力ロス, 最適化

## Effective Utilization for Color-managed Electric Power by Optimized Battery Location and Transmission Management

TOSHIAKI SUZUKI<sup>1,a)</sup> MASAYUKI MURATA<sup>2</sup>

Received: March 26, 2021, Accepted: October 8, 2021

**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, a microgrid that controls power generation, energy storage, and power consumption in an integrated manner has been attracting attention. In the microgrid, generated power is consumed inside the 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, the power exchange between the microgrids is considered. In this paper, we propose a high-efficiency power utilization method that minimizes power loss by transmission, and charge and discharge between microgrids by solving the mathematical programming problem. In the proposed method, the target ratio of power consumption by renewable energy can be also managed by the color management of power which distinguishes power generation by renewable and non-renewable energy. Optimal battery locations, power transmission, and charge and discharge are discussed through the evaluation.

**Keywords:** color-managed electric power, microgrid, battery, power loss, optimization

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> 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

セス保障」等、多数の目標が掲げられている。また、日本政府は、「Society 5.0」[2]を掲げ、サイバー空間とフィジカル空間が高度に融合した新たな人間中心の社会を構築しようとしている。たとえば、フィジカル空間がセンサによりモニタリングされ、サイバー空間において分析が行われ、人々にとって快適な生活を可能とする制御が実行される。そのような制御において創生される価値の1つとして、多様なエネルギーによる安定的、そして継続的なエネルギー供給等が検討されている。

このような状況の下、持続的な社会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 (Renewable Energy, 以下、REと呼ぶ) の利用増加が推進されている。太陽光等による発電では、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、充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[3]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、単体のマイクログリッドを用いた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において発電した電力や充放電装置からの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[4]が有望と考えられる。

筆者らは、これまでマイクログリッド間で電力融通を行う場合において発生する送電ロスを削減する方式について提案、議論[5]している。具体的には、再生可能エネルギーにより発電された電力のみを対象とし、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、送電ロスを削減する方式を議論している。

一方、世界的な方向性として、温室効果ガス削減に向けたゼロエミッション化が推進されている。電力消費にあたり、再生可能エネルギーの利用割合向上が推進されている。しかし、再生可能エネルギーにより発電された電力の利用や充放電装置の利用は、発電量等の安定性やコスト等の課題が存在する。そのため、多様な電源の利用が望ましいと考えられる。また、再生可能エネルギーによる発電量が多い場合と少ない場合が存在するため、その発電量に合

わせた再生可能エネルギーによる電力消費が考えられる。その結果、電力消費にあたり、再生可能エネルギーの利用割合は、状況に応じて0%から100%の間に設定される可能性があると考えられる。電力の需給においては、需要量以上の発電能力を有していても、需要量までしか発電した電力は利用されないと考えられる。また、需要側としてゼロエミッションへ貢献する場合、コスト等の関係から段階的に再生可能エネルギーの利用割合を増加させることが考えられる。そのため、需要側が目標とする再生可能エネルギー利用割合に対し、その各段階において送電や充放電における電力ロスを削減することは重要と考えられる。再生可能エネルギーによる電力の利用割合については、一定の時間を単位として、消費電力量全体に対する再生可能エネルギーにより発電された電力量の割合で算出される値とする。なお、発電や送電等に関連する設備コストを考慮した効率的な再生可能エネルギー利用増加については、別途検討が必要である。

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、充放電機能を利用することにより、必要なときにマイクログリッド間で電力を融通(取引等)する場合の、送電および充放電による電力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、電力の需要側において目標とする再生可能エネルギーの利用割合を達成し、かつマイクログリッド間における電力融通における送電と充放電による「電力ロス」を目的関数とする数理計画問題を解くことにより、電力ロスの削減を図る。

提案方式の評価を通して、配備すべき複数の充放電機能の最適な配備位置や再生可能エネルギー利用の割合に対する電力ロス削減効果について議論する。筆者らの既発表論文[5]では、充放電機能の性能として同様な設定に基づき、送電による電力ロスを削減する方式を議論した。本論文では、充放電機能の性能差を考慮し、送電と充放電による電力ロスの削減を可能とする。また、電力の需要側において目標設定した再生可能エネルギーによる消費の割合(0%から100%の中間値)を達成可能とする。

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、指定された再生可能エネルギー利用割合を達成する電力消費において、送電および充放電による電力ロス低減方式を提案する。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 [6] が実施されている。また、通信ネットワークのアナログにより、電力ネットワークを管理する研究 [7] がされている。特に、分散電源および充放電装置のプラグ&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 [8] されている。そしてスマートホームにおいて、スマートメータや充放電機能を利用した効率的な電力利用制御 [9] ほかが多数研究されている。また、マイクログリッドが充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 [10] 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充放電機能の最適配備 [11] や、放射状のトポロジに対して需要電力抑制を考慮した充放電機能の最適配備 [12] の研究が実施されている。

一方、電力ネットワークにおける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 [13] がされている。また、電力をパケット化して送電する研究 [14], [15] 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。

さらに、個々の電力供給装置と電力消費装置間で送受信される電力フローに対して識別子を付与して管理し、電力需給の安定制御についての研究 [16], [17] がされている。これらの論文では、異なるタイプの発電機により発電された電力に対し、発電等の属性を区別して管理する、電力の「カラー管理」が提案され、電力の需給が制御されている。

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、送電および充放電にともなう電力ロスを削減するための充放電機能の配備位置制御や送電経路制御に着目する。具体的には、再生可能エネルギーによる発電と非再生可能エネルギーによる発電を区別した、カラー管理された電力 (以下、カラー電力と呼ぶ) 取引を実現する。また、需要側において消費される電力に対し、指定した割合の再生可能エネルギーにより発電された電力消費を実現する方式に着目する。さらに、余剰となるカラー電力を一時的に充電し、電力が不足する段階において放電することにより電力の需給バランスさせる制御において、送電および充放電にともなう電力ロスを削減する方式を議論する。

上記の関連研究 [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15] 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。筆者らの研究としては、上記の既存技術をベースとして、送電網の提供者視点で、送電網内に配置した充放電機能を活用することで発電した電力を有効活用し、かつ送電と充放電にともなう電力ロスを最小化する方式を提案する。なお、筆者らの研究と従来の研究 [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15] との関係については、既発表論文 [5] においてより具体的に述べている。

一方、関連研究 [16], [17] では、電力の属性に基づいてカラー管理する観点では類似するが、筆者らの研究では、再生可能エネルギーによる発電か否かに基づいて電力を識別して管理する点で異なる。また、電力の供給機器、充放電機器、および需要機器が広域に複数配備される構成を対象とし、需要側が指定する割合の再生可能エネルギーにより発電された電力消費を実現し、かつ送電と充放電による電力ロスを最小化する充放電機能の配備を算出する点で異なる。なお、充放電機能の配備では、各マイクログリッドに配備された充放電機器に対して、電力ロスを削減するように充放電容量を利用する制御を想定している。

### 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、再生可能エネルギー (Renewable Energy 100%) を利用する太陽光発電機 (Photovoltaic)、再生可能エネルギーを利用しない (Non Renewable Energy, 以下、NRE と呼ぶ) その他発電機、電力消費機器、および充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による発電量変化 (RE100 で示した曲線、以下、RE100 電力と呼ぶ) と、その他の発電機による発電量変化 (NRE で示した直線、以下、NRE 電力と呼ぶ) を示す。横軸は時間単位での 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。一方、化石燃料等を用いるその他の発電機では、安定した発電を想定している。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。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、起床とともに消費電力が少し増加し、帰宅後に消費電力が増加する消費パター



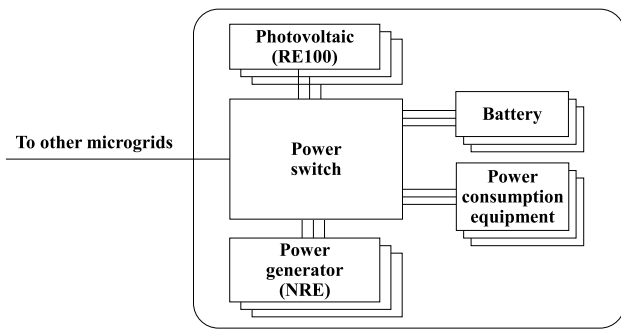


図 1 マイクログリッドの構成例  
Fig. 1 Example of a microgrid.

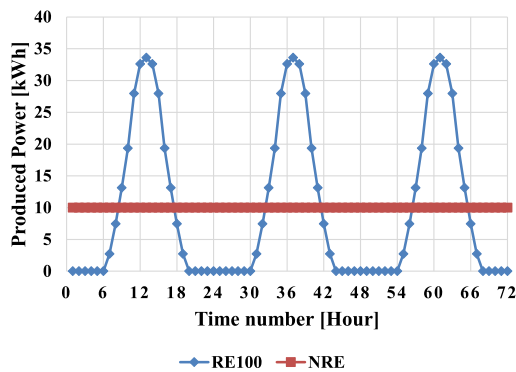


図 2 マイクログリッドにおける発電サイクル  
Fig. 2 Produced-power cycle in a microgrid.

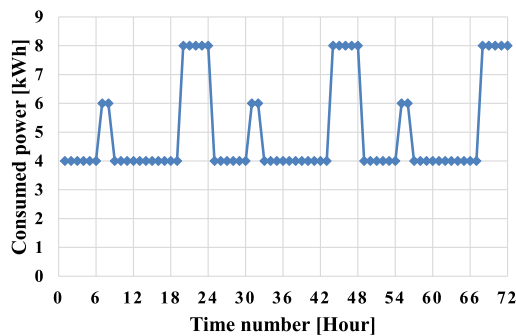


図 3 マイクログリッドにおける消費電力サイクル  
Fig. 3 Consumed-power cycle in a microgrid.

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、充放電機器からの電力供給により対応することを想定している。

### 3.2 広域接続マイクログリッドの概要と課題

図 4 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、図に示した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 4 において「S1」は、個々のマイクログリッドとしての電力収支において RE100 電力が過剰状態にあり、電

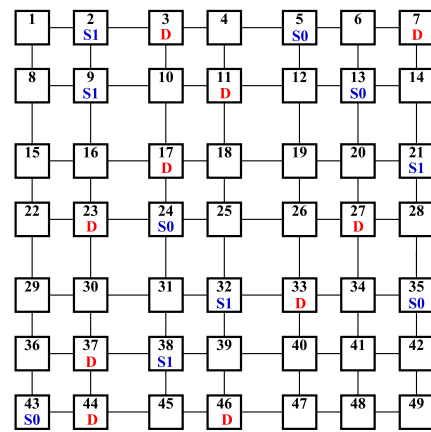


図 4 広域接続マイクログリッド  
Fig. 4 Wide area connected microgrids.

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 の「RE100」の曲線で示した量を一例として用いる。「S0」は、個々のマイクログリッドとしての電力収支において NRE 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、図 2 の「NRE」の直線で示した量を一例として用いる。

一方、図 4 において「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、「S1」、「S0」、「D」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、図 2 および図 3 で示したように、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、充放電機能を利用し、超過する発電量を一時的に充電し、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。しかし、電力の充放電が可能な装置としては性能が異なる様々なタイプがあり、また、利用年数や状況により性能が劣化する。たとえば、文献 [18] では、充放電効率が約 10%劣化する例が示されており、効率の良い充放電機能を利用することが望ましい。そのため、広域接続マイクログリッド内に配備されている充放電装置の充放電機能を利用する必要があるが、適切な位置に存在する充放電機能を選択的に利用しない場合、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充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。また、効率の良い充放電機能を利用する場合、電力の充放電による電力ロスが増加するという課題がある。さらに、本論文では、需要側でのマイクログリッドが希望する再生可能エネルギーの利用度、たとえば80% (RE80) を指定した場合、マイクログリッドにおいて発電された RE100 電力と NRE 電力を用いることにより達成可能とする必要がある。

すなわち、本論文では、発電した電力 (RE100 電力と NRE 電力) を一時的に充電して異なる時間帯に利用することで要求された再生可能エネルギーの利用度を達成するための充放電機能の最適な配備位置や送電経路を決定し、送電ロスを削減可能かつ効率の良い充放電機能を優先的に利用することで充放電ロスを削減可能な方式を提案する。

具体的には、図 4 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 (以下、中継用マイクログリッドと呼ぶ) を送電事業者が活用することにより、送電および充放電による電力ロスを削減する最適な充放電機能配備、および指定された RE 度の電力消費を実行可能とすることを目的とする。

### 3.3 送電経路の決定と充放電機能の配備方針

本論文では、充放電機能を配備し、送電と充放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、文献 [19] を参考とし、送電する電力量や送電距離に対して比例的に増加すると仮定する。また、充放電による電力ロスは、文献 [20] を参考とし、充電した電力量、あるいは放電した電力量に比例すると仮定する。

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) に対して、「送電した距離に比例して発生する電力ロス」と、「充電および放電した電力量に比例して発生する電力ロス」の積算式を規定する。特に、マイクログリッド間で送受信される電力としては、再生可能エネルギーにより発電した電力 (RE100 電力) と、非再生可能エネルギー (NRE 電力) とを区別して、それぞれにおいて発生する電力ロスを積算して評価する。

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 (RE100 電力および NRE 電力) が、充放電機能に充電、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、目的関数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。さらに、提案手法として、充放電機能の最適な配備においては、指定された充放電機能の配備数や容量の制限に基づき、マイクログリッド間で送受信される総電力量に対して、目的関数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. 充放電機能の最適配備と送電制御提案

### 4.1 評価モデルの定義

本論文では、図 4 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充放電機能を配備し、送電および充放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充放電機能を配備するかどうかの決定変数、2) 充放電機能への充電量を制御する決定変数 (NRE 電力用と RE100 電力用)、3) マイクログリッド間の送電量を制御する決定変数 (NRE 電力用と RE100 電力用) を設定し、問題解法のための定式化を行った。

電力需給における電力ロスを最小化するための定式化においては、電力の需給を行うマイクログリッドや電力を中継するマイクログリッドを個別に識別する記号が必要である。また、ある時刻に発電された電力を一時的に充電して電力が不足したときに放電して利用するための充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記号が必要である。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記号が必要である。そして、あるマイクログリッドにより発電された電力 (NRE 電力と RE100 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、各マイクログリッドにおける発電量と消費電力量の変動、および送電による電力のロス率を規定する記号が必要である。余剰に発電された電力を一時的に充放電機能に充電し、発電不足となった段階で放電して利用するにあたり、充放電機能の容量は有限であるため、その上限値としての各マイクログリッドにおける充放電容量を規定する記号が必要である。配備計画としての充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記号が必要である。そして、充放電にともなう電力ロスを算出するにあたり、各充放電機能における電力のロス率を規定する記号が必要である。また、発電前に消費される電力を供給するための初期充電量 (NRE 電力と RE100 電力用) や、余剰に発電された電力を充電するための、最小限必要な充放電機能の容量を規定する記号が必要である。さらに、需要側のマイクログリッドにおいて消費する電力に対して、RE100 電力の利用割合を指定する記号が必要である。また、消費した電力に対して含まれる RE100 電力量を評価するための期間を指定する記号が必要である。以上の設定を行うことによって、より具体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 1 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

表 1 定義した記号リスト  
Table 1 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)
$P_0(i, t)$	時刻 $t$ において, マイクログリッド $i$ から供給される NRE 電力量 (kWh)
$P_{100}(i, t)$	時刻 $t$ において, マイクログリッド $i$ から供給される RE100 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)
$r$	送電による単位距離あたりの電力ロス率
$W(i)$	マイクログリッド $i$ に配備した充放電容量 (kWh)
$M$	充放電機能を利用する中継用マイクログリッド総数 ( $0 < M < N$ )
$\rho(i)$	マイクログリッド $i$ に配備した充放電機能の充放電にともなう電力のロス率
$V_0$	発電前に必要とされる NRE 電力を供給するための初期値 (kWh) (後述する(16)式参照)
$V_{100}$	発電前に必要とされる RE100 電力を供給するための初期値 (kWh) (後述する(17)式参照)
$U$	評価対象期間において余剰に発電される電力を充電するための最小総充放電容量 (kWh) (後述する(18)式参照)
$REX$	消費電力における再生可能エネルギー利用率
$SLOT$	再生可能エネルギーの利用率を評価する期間

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.  $P_0(i, t)$  と  $P_{100}(i, t)$  は, 時刻  $t$  において, マイクログリッド  $i$  から供給される NRE 電力量と RE100 電力量 (kWh) をそれぞれ示す.  $D(i, t)$  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.  $r$  は, 単位距離を送電した場合の電力のロス率を示す.  $W(i)$  は, マイクログリッド  $i$  に配備した充放電の容量 (kWh) を示す.  $M$  は, 充放電機能を利用する中継用マイクログリッドの総数を示す. そのため, マイクログリッドの総数  $N$  に対して,  $0 < M < N$  の関係となる.  $\rho(i)$  は, マイクログリッド  $i$  に配備した充放電機能の充放電にともない発生する電力のロス率を示す.  $V_0$  と  $V_{100}$  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, 初期値としての総充電量 (kWh) を示す (後述する式 (16), (17) 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充電するために最小限必要な総充放電容量 (kWh) を示す (後述する式 (18) 参照).  $REX$  は, 消費電力における再生可能エネルギー利用率を示す.  $SLOT$  は, 再生可能エネルギーの利用率を評価する期間を示す. 電力ロスを評価する総評価期間に対して,  $SLOT$  の値は, 約数にあたる期間を指定する. たとえば, 総評価期間が 48 時間の場合,  $SLOT$  としては, 1 時間, 2 時間や 12 時間といった値が設定される.

#### 4.2 決定変数の定義

本論文では, NRE 電力および RE100 電力に対して, 送電および充放電にともなう電力ロスを削減するための充放電機能の最適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充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 (NRE 電力量と RE100 電力量用) 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充電し, また, どの時刻において充電した電力を放電するかの最適化を図るための変数 (NRE 電力量と RE100 電力量用) が必要である. 以上により, 最適な充放電機能の配置, 送電量, および充放電量を決定するための変数設定を行うことにより, 充放電機能の配置位置と送電および充放電にともなう電力ロスを評価可能になる.

表 2 に, 具体的に設定した決定変数のリストを示す.  $\delta(i)$  は, マイクログリッド  $i$  において, 充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.  $Q_0(i, j, t)$  と  $Q_{100}(i, j, t)$  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 NRE 電力と RE100 電力の電力量 (kWh) を示し, 後述する最適化問題で決定される.  $B_0(i, t)$  と  $B_{100}(i, t)$  は, 時刻  $t$  において, マイクログリッド  $i$  の充放電機能に残存する NRE 電力と RE100 電力の電力量 (kWh) をそれぞれ示し, 後述する最適化問題で決定される. なお,  $\delta(i)$ , および  $B_0(i, t)$  と  $B_{100}(i, t)$  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.

#### 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, 送電と充放電による電力ロスを最小化することを目的としており, 数理計画問題として定式化して評価する. 以下に設定した目的関数を示す.

式 (1) において, 前半部分が NRE 電力に対する送電と充放電による電力ロスを積算する項であり, 後半部分が RE100 電力に対する送電と充放電による電力ロスを積算する項



表 2 決定変数リスト  
Table 2 List of decision variables.

変数	定義
$\delta(i)$	中継用マイクログリッド $i$ において、充放電機能の配備が有：1，無：0
$Q_0(i,j,t)$	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 NRE 電力量 (kWh)
$Q_{100}(i,j,t)$	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 RE100 電力量 (kWh)
$B_0(i,t)$	時刻 $t$ において、マイクログリッド $i$ の充放電機能に残存する NRE 電力量 (kWh)
$B_{100}(i,t)$	時刻 $t$ において、マイクログリッド $i$ の充放電機能に残存する RE100 電力量 (kWh)

である。  $r * C(i,j)Q_0(i,j,t)$  と  $r * C(i,j)Q_{100}(i,j,t)$  は、NRE 電力と RE100 電力の送電による電力ロス量を表す。  $\rho(i)|B_0(i,t) - B_0(i,t-1)|$  と  $\rho(i)|B_{100}(i,t) - B_{100}(i,t-1)|$  は、NRE 電力と RE100 電力の充放電による電力ロス量を表す。本目的関数の最小値を導出することにより、複数充放電機能の最適な配置や送電制御を算出するとともに電力ロスを最小化する。

Minimize

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1, i \neq j}^N \{r * C(i,j)Q_0(i,j,t) \\ & \quad + \rho(i)|B_0(i,t) - B_0(i,t-1)|\} + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1, i \neq j}^N \{r * C(i,j)Q_{100}(i,j,t) \\ & \quad + \rho(i)|B_{100}(i,t) - B_{100}(i,t-1)|\} \end{aligned} \quad (1)$$

以下に制約条件を記載する。

1) 中継用マイクログリッドの電力収支条件：すべての時刻において、ある中継用マイクログリッドに流入する電力量は、流出する電力量と充放電される電力量の総和と等しい必要がある。

式 (2) は、NRE 電力に対する流入と流出の収支条件になる。時刻  $t$  において、マイクログリッド  $i$  における NRE 電力収支は、隣接するマイクログリッド  $k$  から流入する NRE 電力量  $Q_0(k,i,t)$  とマイクログリッド  $k$  へ流出する電力量  $Q_0(i,k,t)$ 、および充電量の変化量の和に等しい。同様に、式 (3) は、RE100 電力に対する流入と流出の収支条件になる。

$$\begin{aligned} & \sum_k Q_0(k,i,t) - \sum_k Q_0(i,k,t) + B_0(i,t-1) - B_0(i,t) \\ & = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \sum_k Q_{100}(k,i,t) - \sum_k Q_{100}(i,k,t) \\ & \quad + B_{100}(i,t-1) - B_{100}(i,t) \\ & = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

2) 供給用マイクログリッドの電力収支条件：すべての時刻において、ある供給用マイクログリッドに流入する電力量は、流出する電力量と発電量の総和と等しい必要がある。

式 (4) は、NRE 電力に対する流入と流出の収支条件になる。時刻  $t$  において、マイクログリッド  $i$  における NRE 電力収支は、隣接するマイクログリッド  $k$  から流入する NRE 電力量  $Q_0(k,i,t)$  とマイクログリッド  $k$  へ流出する電力量  $Q_0(i,k,t)$  および発電量の和に等しい。ただし、需要側で消費される電力において、再生可能エネルギーにより発電された電力の割合を変化可能、および需要と供給量を同量にするため、NRE 電力に対しては、 $(1 - REX)$  の値が発電量  $P_0(i,t)$  に乗算される。

同様に、式 (5) は、RE100 電力に対する流入と流出の収支条件となる。ただし、需要側で消費される電力において、再生可能エネルギーにより発電された電力の割合を変化可能、および需要と供給量を同量にするため、RE100 電力に対しては、 $REX$  の値が発電量  $P_{100}(i,t)$  に乗算される。

$$\sum_k Q_0(k,i,t) - \sum_k Q_0(i,k,t) = -P_0(i,t) * (1 - REX) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \sum_k Q_{100}(k,i,t) - \sum_k Q_{100}(i,k,t) \\ & = -P_{100}(i,t) * REX \end{aligned} \quad (5)$$

3) 需要用マイクログリッドの電力収支条件：すべての時刻において、ある需要用マイクログリッドに流入する電力量は、流出する電力量と需要電力量の総和と等しい必要がある。

式 (6) は、NRE 電力と RE100 電力を合わせた電力に対する流入と流出の収支条件になる。時刻  $t$  において、マイクログリッド  $i$  では、マイクログリッド  $k$  から流入する NRE 電力量  $Q_0(k,i,t)$  と RE100 電力量  $Q_{100}(k,i,t)$  の量が、マイクログリッド  $k$  へ流出する NRE 電力量  $Q_0(i,k,t)$  と RE100 電力量  $Q_{100}(i,k,t)$  および消費する電力量  $D(i,t)$  に等しい。

一方、需要用マイクログリッドが消費する電力量において、再生可能エネルギーにより発電された電力量の割合（以下、RE 度と呼ぶ）を評価する期間（ $SLOT$ ）の設定が必要である。たとえば、1 時間ごとに RE 度を評価するか、あるいは 2 時間ごとに RE 度を評価するかの設定が必要である。式 (7) は、需要側で消費される電力の RE 度が  $REX$  値により設定された場合の NRE 電力に対する収支条件になる。RE 度が  $REX$  値により設定された場合、NRE 電力の消費量は、 $D(i,t)$  に対して  $(1 - REX)$  値が乗算された値となる。流入した電力量を積算する期間は、 $n * SLOT + 1$  から  $(n + 1) * SLOT$  までになる。ここで  $n$  は、 $0, 1, 2, \dots$  の値をとる。たとえば、ここで積算する期間として  $SLOT = 4$  の場合において、 $n = 0$  とすると、 $t = 1$  から 4 までの期間が積算され、その期間において流入し

た電力量の総和が消費された NRE 電力量に等しくなる。そして、 $n = 1$  の場合、 $t = 5$  から 8 までの期間が積算され、その期間において流出した電力量の総和が消費された NRE 電力量に等しくなる。なお、ここで設定される  $SLOT$  値であるが、全評価期間に対する約数が選択される。たとえば、全評価期間が 48 時間の場合、1 時間ごと、2 時間ごとや、12 時間ごと、24 時間ごと等が選択される。また、評価の最後の時刻としては、 $(n + 1) * SLOT = 48$  を満たすように、 $n$  や  $SLOT$  が選択される。

同様に、式 (8) は、需要側で消費される電力の RE 度が  $REX$  値により設定された場合の RE100 電力に対する収支条件になる。ただし、RE 度が  $REX$  値により設定された場合、RE100 電力の消費量は、 $D(i, t)$  に対して  $REX$  値が乗算された値となる。

$$\sum_k Q_0(k, i, t) - \sum_k Q_0(i, k, t) + \sum_k Q_{100}(k, i, t) - \sum_k Q_{100}(i, k, t) = D(i, t) \quad (6)$$

$$\sum_{t=n*SLOT+1}^{(n+1)*SLOT} \left\{ \sum_k Q_0(k, i, t) - \sum_k Q_0(i, k, t) \right\} = \sum_{t=n*SLOT+1}^{(n+1)*SLOT} D(i, t) * (1 - REX) \quad (7)$$

$$\sum_{t=n*SLOT+1}^{(n+1)*SLOT} \left\{ \sum_k Q_{100}(k, i, t) - \sum_k Q_{100}(i, k, t) \right\} = \sum_{t=n*SLOT+1}^{(n+1)*SLOT} D(i, t) * REX \quad (8)$$

4) 送電条件：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。式 (9) は、NRE 電力に対する送電条件になる。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  $Q_0(i, j, t)$  が、送電可能な上限値  $L(i, j)$  以下である。同様に、式 (10) は、RE100 電力に対する送電条件になる。また、式 (11) は、マイクログリッド  $i$  から  $j$  へ送電する NRE 電力量  $Q_0(i, j, t)$  と RE100 電力量  $Q_{100}(i, j, t)$  の和に対する送電条件になる。

$$0 \leq Q_0(i, j, t) \leq L(i, j) \quad (9)$$

$$0 \leq Q_{100}(i, j, t) \leq L(i, j) \quad (10)$$

$$0 \leq Q_0(i, j, t) + Q_{100}(i, j, t) \leq L(i, j) \quad (11)$$

5) 充放電機能数条件：充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、最適な充放電機能を配備する必要がある。式 (12) が、充放電機能配備数の条件になる。充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。

$$\sum_{i=1}^N \delta(i) \leq M \quad (12)$$

6) 充放電条件：充放電機能を配備したマイクログリッドにおいてのみ、充放電機能の上限値以内で充放電が可能である。式 (13) は、NRE 電力に対する充放電の容量条件

になる。時刻  $t$  において、充放電機能を有するマイクログリッド  $i$  に充電された電力量  $B_0(i, t)$  が、指定された容量  $W(i)\delta(i)$  以下である。同様に、式 (14) は RE100 電力に対する充放電の容量条件になる。また、式 (15) は、充放電機能を有するマイクログリッド  $i$  に充電された NRE 電力量  $B_0(i, t)$  と RE100 電力量  $B_{100}(i, t)$  の和に対する充放電の容量条件になる。

$$0 \leq B_0(i, t) \leq W(i)\delta(i) \quad (13)$$

$$0 \leq B_{100}(i, t) \leq W(i)\delta(i) \quad (14)$$

$$0 \leq B_0(i, t) + B_{100}(i, t) \leq W(i)\delta(i) \quad (15)$$

7) 充電量の初期値条件：発電が不十分な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充電しておく必要がある。式 (16) は、NRE 電力に対する充電量の初期値条件になる。NRE 電力の供給量不足が発生しないために、初期値としての充電量  $B_0(i, 0)$  の和が、指定された電力量初期値  $V_0$  (kWh) に等しい値である。同様に、式 (17) は、RE100 電力に対する充電量の初期値条件になる。

$$\sum_{i=1}^N B_0(i, 0) = V_0 \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^N B_{100}(i, 0) = V_{100} \quad (17)$$

8) 充放電機能の総容量条件：ある時刻に発電された余剰な電力を廃棄せず充電するためには、必要最小限以上の充放電容量を全体として配備する必要がある。式 (18) が、充放電機能の総容量条件になる。配備される充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充電保持するために必要な最小限の充放電容量  $U$  (kWh) 以上である。

$$\sum_{i=1}^N W(i)\delta(i) \geq U \quad (18)$$

#### 4.4 NRE 電力と RE100 電力の需給管理方式

図 5 に、前節において説明した制約条件を用いた、NRE 電力と RE100 電力の需給管理の概要を示す。提案する方式では、需要側が指定する再生可能エネルギーの利用割合を管理するため、基本的に NRE 電力と RE100 電力を区別して管理する。具体的には、NRE 電力と RE100 電力それぞれに対して、送電量および充放電量を管理する異なる変数を導入することで、NRE 電力と RE100 電力の需給を分離して管理する。ただし、充放電機能については、NRE 電力と RE100 電力の両方について充放電機能を共有する想定のため、充電した合算量が充放電機能の許容値を超えないように制限する必要がある。また、送電においても、NRE 電力と RE100 電力の合算した送電量が、許容値を超えないように制限する必要がある。さらに、電力消費においては、需要側が指定した再生可能エネルギーの利用割合



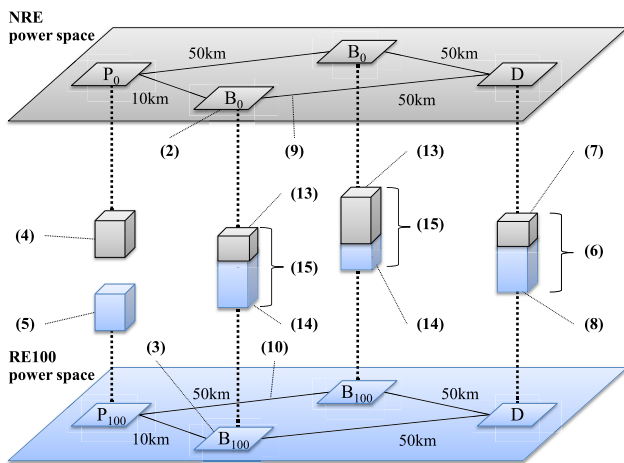


図 5 NRE 電力と RE100 電力の需給管理

Fig. 5 NRE and RE100 power supply and demand management.

となるように、NRE 電力と RE100 電力の消費割合を制御する必要がある。

図 5 に示した設定では、電力供給側より NRE 電力 ( $P_0$ ) と RE100 電力 ( $P_{100}$ ) が供給される。また、電力需要側では、指定した RE 度の電力消費 ( $D$ ) を想定している。一方、供給電力量と需要電力量が各時刻において一致していない場合、余剰となった NRE 電力と RE100 電力を一時的に充放電機能に充電し、電力が不足した場合に放電して利用することを想定している。

上記の電力需給制御、特に需要側において指定した RE 度の電力消費を実現する場合、カラー管理された電力 (NRE 電力と RE100 電力) を適切に混合することにより達成する必要がある。そのためには、NRE 電力と RE100 電力を区別して管理する必要があり、図 5 に示したように、NRE 電力空間と RE100 電力空間を導入する。

NRE 電力と RE100 電力それぞれについては、基本的に NRE 電力空間と RE100 電力空間で個別に管理される。しかし、余剰となった NRE 電力と RE100 電力を一時的に充電し、不足が発生した段階で放電する充放電については、NRE 電力と RE100 電力の充電した総量が、充放電機能の許容量以下に制御する必要がある。また、需要側では、指定した RE 度の電力消費を実行するため、RE 度評価期間において消費する NRE 電力量と RE100 電力量の比率が指定した比率になるように電力消費を制御する必要がある。

具体的には、NRE 電力空間において、電力を供給するマイクログリッドでは、式 (4) により NRE 電力供給制御が実行される。NRE 電力を充放電するマイクログリッドでは、式 (13) により NRE 充電量制御が実行される。また、流出入する NRE 電力量は、式 (2) により制御される。さらに、マイクログリッド間での NRE 送電量は、式 (9) により制御される。需要側での NRE 電力消費については、式 (7) により制御が実行される。

また、RE100 電力空間において、電力を供給するマイクログリッドでは、式 (5) により RE100 電力供給制御が実行される。RE100 電力を充放電するマイクログリッドでは、式 (14) により RE100 充電量制御が実行される。また、流出入する RE100 電力量は、式 (3) により制御される。さらに、マイクログリッド間での RE100 送電量は、式 (10) により制御される。需要側での RE100 電力消費については、式 (8) により制御が実行される。

一方、NRE 電力空間と RE100 電力空間にまたがった空間として、NRE 電力と RE100 電力の総和としての需要量は、式 (6) により制御される。また、NRE 電力と RE100 電力の総和としての充電量は、式 (15) により制御される。その他、図示していないが、マイクログリッド間において送電される NRE 電力量と RE100 電力量の総和は、式 (11) により制御される。また、配備される充放電機能の総数は、式 (12) により制御される。

## 5. 提案方式の評価と結果

### 5.1 評価概要

提案方式の評価では、第 1 に、送電と充放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充放電機能数および充放電容量と、電力ロスの関係を明らかにする。本評価では、広域接続マイクログリッドへ配備する充放電機能数  $M$  と充放電容量  $W(i)$  をパラメータとして変更し、それぞれの場合における目的関数式 (1) の最小値を比較し、充放電機能を配備すべきマイクログリッド数と、装備すべき充放電機能の容量を評価する。具体的には、容量の小さな充放電機能を多数配備する場合と、容量の大きな充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と充放電による電力ロスを削減する効果が高いかを明らかにする。そのため、充放電機能の配備数  $M$  と充放電容量  $W(i)$  の積を一定値に固定し、配備すべき充放電機能数と充放電容量の組合せを変更して電力ロス削減の効果を評価する。また、提案方式の有効性を検証するため、送電距離を最小化するように制御した場合 (Route-based method) と提案方式 (Proposed method) とを比較評価する。なお、第 1 の評価では、充放電機能の利用度が最も高くなる場合、すなわち RE100 電力消費が 100% の場合 (RE 度 = 100%) において評価する。

第 2 に、第 1 の評価において実施した、充放電機能の配備数  $M$  と充放電容量  $W(i)$  の積の組合せに対して、さらに需要側の要求する RE 度を 0% から 100% まで変更し、配備する充放電機能数と充放電容量の組合せ、および需要側の要求する RE 度と、電力ロス量との関係について評価する。具体的には、要求された各 RE 度に対して、電力ロス量を最小化とする充放電機能数と充放電容量の組合せを明らかにする。

第 3 に、需要側が要求する RE 度が 0% から 100% に対

して、RE度を評価する期間を変更し、評価期間と電力ロス削減効果の関係を評価する。たとえば、需要側においてRE50が要望され、1時間ごとにRE度を評価する場合、1時間ごとにRE100電力を50%およびNRE電力を50%供給する制御が必要となる。一方、2時間ごとにRE度を評価する場合、RE100電力の発電が少ない状況において、前半の1時間ではNRE電力を100%供給し、RE100電力の発電が増加した段階の後半1時間においてRE100電力を100%供給するような制御が可能となる。このような制御の違いにおいて、発生する電力ロス量の差を評価する。そのため、需要側の電力消費においてRE度を評価する期間として、1時間ごと、2時間ごとや8時間ごとといったように、複数の評価期間に対して、電力ロス削減効果の高い評価期間を明らかにする。

5.2 評価モデルの設定

表3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のリージョン設定[11]や34ノードのマイクログリッド設定[12]で評価を行っている研究、および国内の都道府県数が47であることを考慮し、図6に示した構成を一例として用いる。類似構成として、欧州における電力ネットワークトポロジ[21]では、隣接する国・地域間において相互に電力の融通が可能な構成となっている。文献[10]では、18の配電ネットワークを隣接接続したトポロジにおいて評価を行っている。本論文が想定する格子上のトポロジは、隣接するマイクログリッド間において相互に電力の融通が可能な構成であり、類似性のある代表的なトポロジと考えられ、評価用のトポロジとして選定している。図6中に示した電力の供給マイクログリッド(S1, S0)と需要マイクログリッド(D)は、ランダムに配置設定している。配備するマイクログリッド数Nは49(識別子:1~49)とする。なお、評価では図6に示したパターンとは異なる4パターンと合わせた合計5パターンに対して評価を行い、その平均値を評価結果とする。

評価を実施する期間(tの範囲)を選定するにあたり、図3に示した電力需要を10カ所に配備し、また、図2のRE100電力供給を5カ所(S1)に配備して電力供給することにより需要を満たす場合(100% RE100 demand 対応)と、NRE電力供給を5カ所(S0)に配備して需要を満たす場合(100% NRE demand 対応)に対して、充放電機能に残存する電力量推移を予備評価した。その評価結果を図7に示す。本結果より、初期状態の影響を抑制するため、RE100電力の充電量が0を繰り返す、時刻番号が8から56の48時間を評価期間として選定した。そして、その期間を改めて、t=0から48と設定した。本評価では、式(1)に示した目的関数を評価する期間として48時間を設定、および1時間ごとに発生する電力ロス量を積算して最

表3 定義した記号の設定値リスト  
Table 3 Value of each defined symbol.

定数	設定値
$i$	1, ..., 49
$t$	0, ..., 48
$C(i,j)$	図6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)
$P_0(i,t)$	パターン1(図6)の場合、 $i=5, 13, 24, 35, 43$ (5カ所)に対して、図2に示したNRE発電量を設定(kWh)
$P_{100}(i,t)$	パターン1(図6)の場合、 $i=2, 9, 21, 32, 38$ (5カ所)に対して、図2に示したRE100発電量を設定(kWh)
$D(i,t)$	パターン1(図6)の場合、 $i=3, 7, 11, 17, 23, 27, 33, 37, 44, 46$ (10カ所)に対して、図3に示した消費電力量を設定(kWh)
$r$	0.0001 (1km送電に対して0.01%電力ロス)
$W(i)$	37.5, 50, 75, 150, 375, 750 (kWh)
$M$	20, 15, 10, 5, 2, 1
$\rho(i)$	マイクログリッドの番号 <i>i</i> が奇数:5%電力ロス, 偶数:15%電力ロス(図8評価), 番号に依存せず5%, あるいは15%の電力ロスを半数ずつランダムに設定(図9評価)
$V_0$	40, 36, 32, 28, 24, 20, 16, 12, 8, 4, 0 (kWh)
$V_{100}$	0 (kWh)
$U$	738.4 (kWh)
$REX$	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 (%)
$SLOT$	1, 2, 4, 8, 12, 24, 48 (時間)

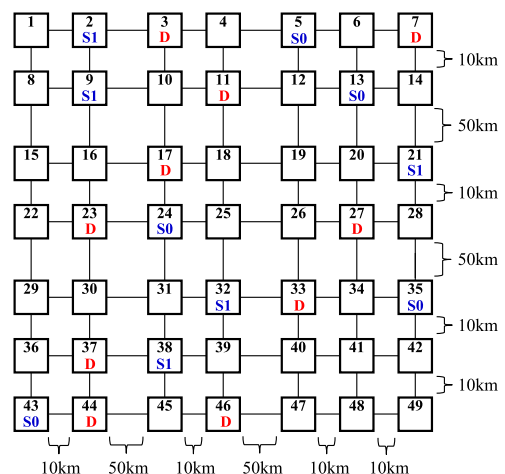


図6 マイクログリッド間の距離設定  
Fig. 6 Distance between microgrids.

小値となる充放電機能の配備位置や送電の制御を算出している。このような算出では、1時間ごとの送電制御や充放電の制御を前提としているが、他の値、たとえば30分

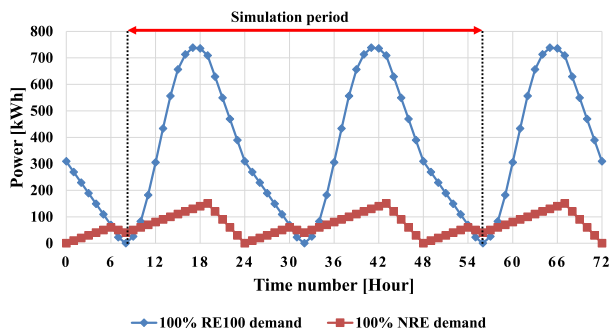


図 7 充電量の変動

Fig. 7 Change in battery charge volume.

ごとの制御を前提とした場合、 $t$ の値としては2倍の0から96を設定することにより、式(1)に示した目的関数を用いて評価が可能である。

マイクログリッド間の距離  $C(i, j)$  としては、図6に示したように、10km、あるいは50km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、1,000kWhと設定する。

供給可能なNRE電力量  $P_0(i, t)$  として、5カ所のマイクログリッド ( $i = 5, 13, 24, 35, 43$ ) から電力供給を行い(パターン1の場合)、それぞれの供給量として、すべて図2に示したNRE発電量を用いる。また、供給可能なRE100電力量  $P_{100}(i, t)$  として、5カ所のマイクログリッド ( $i = 2, 9, 21, 32, 38$ ) から電力供給を行い(パターン1の場合)、それぞれの供給量として、すべて図2に示したRE100発電量を用いる。さらに、需要電力量  $D(i, t)$  として、10カ所のマイクログリッド ( $i = 3, 7, 11, 17, 23, 27, 33, 37, 44, 46$ ) 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。

送電による電力ロスについては、文献[19]を参考に送電距離に比例するとして、1km送電ごとに0.01% (0.0001)の電力ロスが発生する設定とした。マイクログリッドに配備する充放電の容量  $W(i)$  は、図7に示した充電量の予備評価より選定した。具体的には、充放電の容量として必要とされる最小量が738.4kWhとなることを考慮し、総容量として750kWhになるような充放電機能の配備数  $M$  と容量  $W(i)$  の組合せを選定した。配備数  $M$  が20, 15, 10, 5, 2, 1の場合、充放電容量  $W(i)$  としては37.5, 50, 75, 150, 375, 750kWhをそれぞれ選定している。

充電および放電において発生する電力ロス  $\rho(i)$  については、第1のパターンとして、マイクログリッドの番号  $i$  が奇数の場合に5%の電力ロスが発生し、偶数の場合は15%の電力ロスが発生する設定(図8評価)とした。また、第2のパターンとして、マイクログリッドの番号に依存せず、5%あるいは15%の電力ロスを半数ずつランダムに設定(図9評価)した。文献[20]では、充放電効率とし

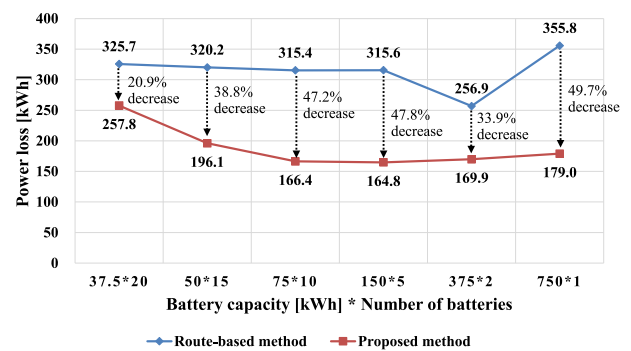


図 8 充放電容量と充放電配備数に対する電力ロス評価(1)

Fig. 8 Power loss evaluation (1) by changing capacity and number of batteries.

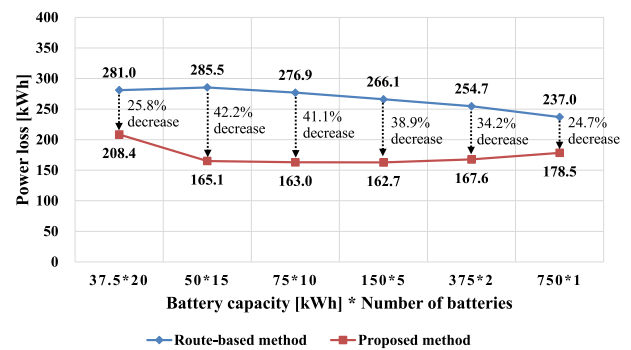


図 9 充放電容量と充放電配備数に対する電力ロス評価(2)

Fig. 9 Power loss evaluation (2) by changing capacity and number of batteries.

て、70%、80%、90%を想定した検討をしている。本評価における充電あるいは放電において発生する、5%あるいは15%の電力ロスは、充放電効率としては、90%と70%に相当する。本評価では、充放電効率が高い場合の例として、充電あるいは放電において5%の電力ロスが発生すると設定した。また、効率が低い場合の例として、15%の電力ロスが発生すると設定した。充放電機能が最初に充電しておく必要のある電力量  $V_0$  や  $V_{100}$  は、図7に示した形式の予備評価より以下の事前充電が必要なことを算出している。具体的には、需要側が要求するRE度が0%から100%まで10%間隔で変化する場合、 $V_0$  は、40, 36, 32, 28, 24, 20, 16, 12, 8, 4, 0 (kWh)と変化する。一方、RE100電力の事前充電量については、図7において充電量の変化が0となる時刻より評価を開始する設定としたため、 $V_{100}$ の値は0となる。

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充電保持するために必要な最小の総充電容量  $U$  は、図7に示した充電量の予備評価より算出した。図7の結果より、充放電機能が必要とする最小の充放電容量は、738.4kWhとなる。需要側のマイクログリッドが指定する電力消費のRE度である  $REX$  については、0%から100%までの10%間隔とした。また、RE度を評価する期間である  $SLOT$  については、総評価期間が48時間であるこ



とを考慮し、1, 2, 4, 8, 12, 24, 48 時間の 7 パターンとした。

### 5.3 評価結果

#### 5.3.1 充放電容量と充放電設備数に対する電力ロス評価結果

図 8 および図 9 に、充放電機能の容量と設備数を変化させた場合の電力ロス評価結果を示す。具体的には、総充放電容量として必要な最小容量である  $U$  を満たすように、充放電容量と設備数の積が、750 kWh になる組合せについて発生する電力ロス量を評価している。また、提案方式 (Proposed method) の有効性を検証するため、送電距離を最小化するように充放電機能を配備する方式 (Route-based method) との比較を示している。図 8 に示した評価では、図 6 に示したパターンとは異なる 4 パターンと合わせた合計 5 パターンに対して評価を行い、その平均値を評価結果としている。図 9 に示した評価では、図 6 に示したトポロジにおける各マイクログリッドに対して、異なる充放電効率 (5%ロス, 15%ロス) を半数ずつランダムに設定して評価した 5 回の平均値を評価結果としている。なお、本評価では、 $SLOT$  の値を 1 として、1 時間ごとに指定した RE 度 (100%) を満たすように電力の需給を制御している。

図 8 に示した提案方式の評価において、容量が 150 kWh の充放電機能を 5 カ所の中継用マイクログリッドへ配備する場合、送電と充放電による電力ロス量が最小の 164.8 kWh となるという結果を得た。また、充放電機能を 20 カ所、あるいは 15 カ所に配備した場合は、5 カ所に配備した場合を基準として、電力ロス量が大幅に増加する結果を得た。同様に、図 9 に示した評価では、容量が 150 kWh の充放電機能を 5 カ所の中継用マイクログリッドへ配備する場合、送電と充放電による電力ロス量が最小の 162.7 kWh となるという結果を得た。

図 8 と図 9 の電力ロス評価における、提案方式 (Proposed method [P]) と送電距離を最小化するように充放電機能を配備する方式 (Route-based method [R]) による電力ロス評価結果に対する分散を、表 4 と表 5 に示す。全 12 種類の評価のうち、11 種類の評価において提案方式の方が、分散が小さい結果となった。また、提案方式では、利用する充放電機能数が多い場合には、分散が増加する傾向となった。一方、送電距離を最小化する方式では、利用する充放電機能数が少ない場合に、分散が増加するという傾向となった。

本評価では、配備する充放電機能の総容量を一定 (750 kWh) として、個々の充放電容量と機能設備数の組合せを変えて評価している。そのため、容量の小さな充放電機能を多数配備する場合と、容量の大きな充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と充放電による電力ロス量を削減する効果が高いかを評価可

表 4 Route-based method [R] と Proposed method [P] における評価結果の分散比較 (1)

Table 4 Variance comparison (1) of evaluation results in route-based method [R] and proposed method [P].

Method	37.5*20	50*15	75*10	150*5	375*2	750*1
[R]	845	513	520	678	4698	20309
[P]	580	625	30	35	12	17

表 5 Route-based method [R] と Proposed method [P] における評価結果の分散比較 (2)

Table 5 Variance comparison (2) of evaluation results in route-based method [R] and proposed method [P].

Method	37.5*20	50*15	75*10	150*5	375*2	750*1
[R]	1026	896	2878	4700	5073	13958
[P]	377	2	2	1	0	1

能となっている。評価結果より、今回設定した評価条件においては、容量が 150 kWh の充放電機能を 5 カ所の中継用マイクログリッドへ配備する場合が最良の結果となった。また、容量の小さな充放電機能を 20 カ所や 15 カ所のように多数配備する場合は、送電と充放電による電力ロス量を増加させる可能性があることを確認した。

一方、提案方式 (Proposed method) と送電距離を最小化するように充放電機能を配備する方式 (Route-based method) [5] との比較においては、充放電容量と設備数のいずれの組合せにおいても、送電と充放電による電力ロス量が 20%以上削減となるという結果を得た。これにより、提案方式の優位性が確認された。

#### 5.3.2 充放電容量一定での RE 度に対する電力ロス評価結果

図 10 に、総充放電容量一定 (750 kWh) において、需要側が指定した RE 度の電力消費を達成するにあたり、送電と充放電により発生する電力ロス量の評価結果を示す。なお、本評価においても、異なる 5 パターンの配置に対する平均値を評価結果としている。また、 $SLOT$  の値を 1 として、1 時間ごとに指定した RE 度を満たすように電力の需給を制御している。この評価では、需要側が要求する RE 度、および配備する充放電容量と設備数の組合せに対して、発生する電力ロス量との関係性を評価可能となっている。

図 10 に示されるように、需要側が要求した RE 度が 0%から 100%へ増加するにつれて、送電と充放電による電力ロス量が増加する傾向にある。また、RE 度が 60%以上かつ充放電機能を 15 カ所以上配備するような場合、電力ロス量が大幅に増加するという結果を得た。また、容量が 375 kWh や 750 kWh といった容量の大きい充放電機能を少数配備する場合も、電力ロス量が増加する傾向となった。

これにより、今回設定した評価条件では、RE 度が 60%以上と高い要求となるような場合、少容量の充放電機能を多

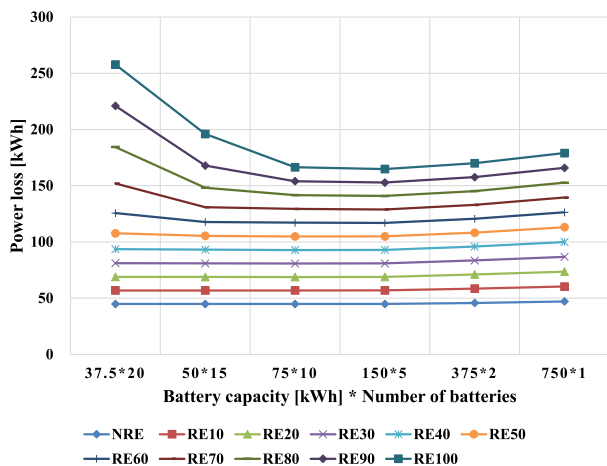


図 10 充放電容量一定での RE 度に対する電力ロス評価

Fig. 10 Evaluation of power loss for RE degree at constant battery amount.

数配備すると電力ロス量が増加するため、配備数が 20 カ所や 15 カ所といった多数にならないような容量の充放電機能を配備することで、電力ロス量の増加を防止可能であるという結果を得た。また、需要側が要求した RE 度が 50% 以下の場合、発生する電力ロス量は、配備する充放電機能の容量と配備数に対する影響が少ないという結果を得た。

図 11 に、一例として図 6 に示した構成で RE50 の電力需要が要求された場合に、150 kWh の充放電機能を 5 カ所へ配備する場合の最適な配置の算出結果を示す。図において、「B」の文字が記載され、赤色の太枠で囲まれたマイクログリッド (ID = 1, 15, 19, 29, 39) が、充放電機能を配備して利用すべき最適位置になる。本評価では、偶数のマイクログリッドに配備する充放電機能は、充放電に対して 15% の電力ロスが発生し、奇数のマイクログリッドに配備する充放電機能は 5% の電力ロスが発生するという設定としている。そのため、送電による電力ロス (1km 送電で 0.01% 電力ロス) と充放電による電力ロスとを比較し、少し離れた位置にあるが奇数番号のマイクログリッドにある効率の良い充放電機能が優先的に選定されたという結果となっている。

図 12 と図 13 に、一例として RE50 の電力需要が要求された場合に、図 11 で示したマイクログリッドに配備した各充放電機能 (ID = 1, 15, 19, 29, 39) において、RE100 電力と NRE 電力の残存する電力量の変化を示す。また、参考として、RE100 電力の総充電残量 (RE100 all 曲線) と、NRE 電力の総充電残量 (NRE all 曲線) を合わせて表示している。図の結果より、マイクログリッドにおける各充放電機能では、RE100 電力と NRE 電力を区別して充放電管理可能ことが確認された。これにより、時刻単位での充電や送電がされたことになり、RE 度を考慮した充放電機能の最適な配備や送電および充放電制御が可能ことが確認された。

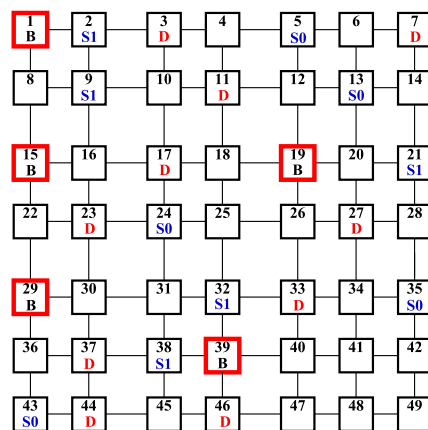


図 11 RE50 需要における充放電機能 150 kWh\*5 最適配置

Fig. 11 Optimal locations of 150 kWh\*5 batteries for RE50 power demand.

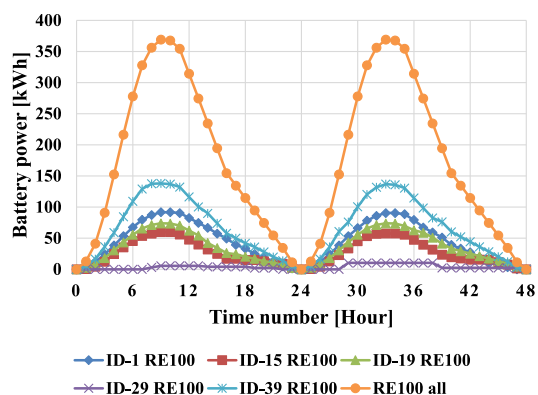


図 12 RE50 需要における RE100 電力の充電量変化

Fig. 12 Change in RE100 battery power amount for RE50 power demand.

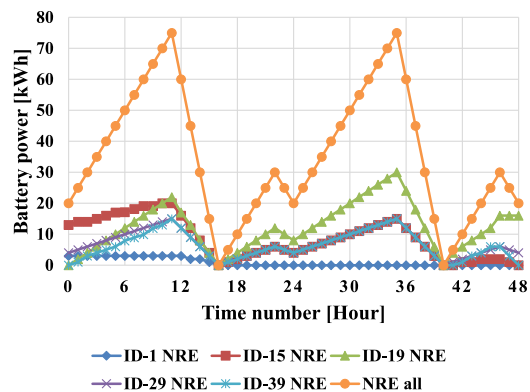


図 13 RE50 需要における NRE 電力の充電量変化

Fig. 13 Change in NRE battery power amount for RE50 power demand.

### 5.3.3 RE 度評価期間に対する電力ロス評価結果

図 14 に、需要側が要求する RE 度の評価期間に対する電力ロス量の評価結果を示す。なお、本評価では、図 8 に示した第 1 の評価において、電力ロス量が最良となった充放電容量と配備数の組合せ、すなわち、150 kWh の充放電機能を 5 カ所のマイクログリッドへ配備する場合を代表と

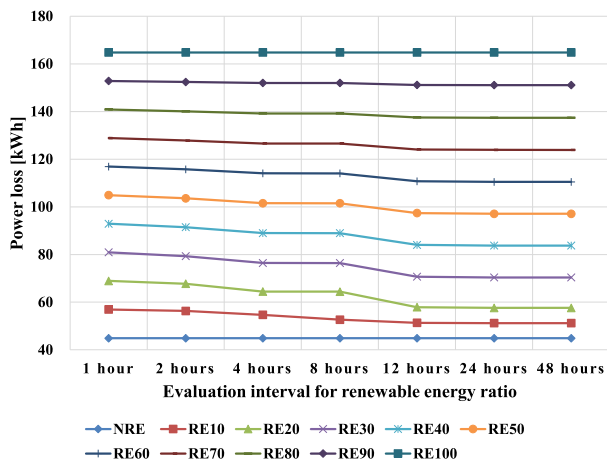


図 14 RE 度評価期間に対する電力ロス評価

Fig. 14 Evaluation of power loss for RE-evaluation interval.

して評価している。本評価においても他の評価と同様に、異なる 5 パターンの配置に対する平均値を評価結果としている。この評価では、RE 度を評価する期間として、1 時間ごと、2 時間ごとや 8 時間ごとといったように、要求された RE 度を達成するための期間に対して、送電と充放電により発生する電力ロス量との関係性を評価可能となっている。

図 14 に示されるように、RE 度が 10 % から 90 % については、RE 度を評価する期間が長期化することにより、発生する電力ロス量が減少するという傾向を得た。特に、RE 度の評価期間が 12 時間となるような場合、1 時間ごとに RE 度を評価する場合と比較し、発生する電力ロス量を大幅に（最大で約 16%）削減可能であるという結果を得た。

一方、RE 度が 0% (NRE) と 100% (RE100) の場合は、関係するカラー電力が、NRE 電力または RE100 電力の一方となり相互に補うことができないため、発生する電力ロス量の削減がされていない。また、RE 度が 70% 以上では、RE 度の評価期間を 24 時間に設定しても、発生する電力ロス量は 5% 未満の削減となるという結果を得た。さらに、RE 度の評価期間が 24 時間の場合と 48 時間の場合を比較すると、今回設定した評価条件（24 時間ごとに供給や需要が繰り返す設定）では、発生する電力ロス量に変化がないという結果を得た。

以上の結果より、今回設定した評価条件では、RE 度が 60% 以下かつ RE 度の評価期間を 12 時間とするような場合に、発生する電力ロス量を比較的削減が可能であるという結果を得た。

## 6. 考察

図 8 から図 10 に示した充放電容量と充放電設備数に対する電力ロス評価では、150 kWh の充放電機能を 5 カ所に配備する場合において、電力ロス量が最小となるという結果となった。37.5 kWh や 50 kWh といった小容量の充放電機能を 20 カ所、あるいは 15 カ所のマイクログリッドに配備

する場合、提案した電力ロス最小化の方式により、効率の良い充放電機能を優先的に利用する設定となるが、設備数が増加すると効率の良い充放電機能利用が発生し、結果として電力ロス量が増加していると考えられる。また、750 kWh といった大容量の充放電機能を 1 カ所のマイクログリッドへ配備する場合、電力の供給マイクログリッドと需要マイクログリッド間を接続する最短経路ではない位置に存在する充放電機能を利用する必要があり、その結果として送電距離が増加し、電力ロス量が増加したと考えられる。なお、本評価では、NRE 電力と RE100 電力の供給マイクログリッドとしてそれぞれ 5 カ所、また需要側のマイクログリッドとして 10 カ所を設定した評価となっている。そのため、電力供給マイクログリッド数と需要マイクログリッド数が大きく異なるような場合は、充放電機能の最適な配備位置は本結果と異なると考えられ、設定ごとに評価が必要と考えられる。

一方、図 8 において比較評価した Route-based method [5] の場合は、送電距離は最適化されるが、効率の良い充放電機能を優先的には利用せず、送電距離を最適化するマイクログリッドに存在する充放電機能を利用するため、効率の良い充放電機能を利用する場合とそうでない場合の両方が存在し、結果として送電と充放電による電力ロス量が増加していると考えられる。また、750 kWh の充放電機能を利用した場合は、送電距離を最適化する 1 カ所のマイクログリッドへ配備した充放電機能を利用するため、その充放電機能の効率がよくない場合、大幅な電力ロスが発生することになる。そのため、5 パターンにおける評価の平均値としても、大きな電力ロス量が発生するという結果になったと考えられる。

図 9 の比較評価においても、Route-based method の場合は、送電距離は最適化されるが、効率の良い充放電機能を優先的には利用せず、送電距離を最適化するマイクログリッドに存在する充放電機能を利用する。一方、提案方式では、送電距離と充放電の効率を考慮して電力ロスを最小化しており、効率の良い充放電機能を優先的に利用した結果、Route-based method に比較し優位な結果になったと考えられる。

表 4 と表 5 の結果より、提案方式では、利用する充放電機能数が多い場合には、分散が増加する傾向となった。利用する充放電機能数が増加した場合、効率の良い充放電機能の配置や数が配置パターンにより変動し、効率の良い充放電機能の利用増加が発生し、結果として電力ロスが増加したために分散が増加したと考えられる。また、利用する充放電機能数が少ない場合は、電力需給用のマイクログリッドの配置が異なる場合（表 4）や、充放電効率の設定がランダムな場合（表 5）のいずれに対しても、送電距離と充放電効率の両方を考慮して電力ロスを最小化する充放電機能の利用を実行するため、電力ロスの増加が防止さ



れ、結果として分散の増加が抑制されたと考えられる。

一方、Route-based method では、利用する充放電機能数が少ない場合に、分散が増加する傾向となった。Route-based method では、送電距離のみを最小化するように利用する充放電機能を選択するため、最短経路上に効率の良い充放電機能が存在しない場合、効率の良くない充放電機能を利用する。そのため、表 4 や表 5 の評価では、最短経路上において効率の良い充放電機能が存在しないパターンが発生すると、効率の良くない充放電機能を利用することになる。その結果、電力ロス量が増加し、分散が増加したと考えられる。特に、利用する充放電機能数が 1 の場合、最短経路上に存在する充放電機能の効率が良い場合とそうでない場合において、その影響を強く受けるため、分散が大きく増加したと考えられる。

図 14 に示した、RE 度と評価期間としての *SLOT* を変更した電力ロス量評価では、RE 度が 60%以下 (0%を除く) かつ 12 時間間隔において RE 度を評価すると、電力ロス量を大幅に削減可能であるという結果となった。これは、必要とするカラー電力として NRE 電力と RE100 電力の双方があり、発生する電力ロス量を削減するように、それぞれの消費タイミングを柔軟に調整した結果と考えられる。NRE 電力あるいは RE100 電力の一方のみを需要する場合や、一方の残電力量に余剰が十分でない場合は、カラー電力の利用タイミングを調整できないため、RE 度を評価する期間を変更しても、発生する電力ロス量を削減できなかったと考えられる。

今回の評価では、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、配備する充放電機能数が極端に多い場合や少ない場合、また、適切でない位置に充放電機能を配備する場合は、送電にともなう電力ロス量が増加するといった特性を明らかにしたと考えられる。また、効率の良い充放電機能 (充電あるいは放電で 5%の電力ロス発生) と効率の良くない充放電機能 (充電あるいは放電で 15%の電力ロス発生) の 2 種類を配備し、効率の良くない充放電機能を利用すると、充放電にともなう電力ロス量が増加するといった特性も明らかにした。

また、需要側のマイクログリッドで消費する電力に対して、RE 度を 0%から 100%まで変更して評価することにより、RE 度が高くなると送電と充放電による電力ロス量が増加すること、および少容量の充放電機能を多数配備する場合に、電力ロス量が急増する傾向について明らかにしたと考えられる。さらに、RE 度を評価する期間を 1 時間から 48 時間の間で変化させて電力ロス量の変化を評価することにより、太陽光による発電等を模擬した今回の評価条件では、12 時間程度の評価間隔をとることにより、発生する電力ロス量を削減可能な特性についても明らかにしたと考えられる。

以上の結果、今回の定式化によって、充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、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、マイクログリッド間での送電量や充放電量を変数として解を導出しており、解法としてはトポロジに依存していないため、異なるタイプのトポロジに対しても適用可能と考えられる。ただし、トポロジが異なる場合は、異なる結果になると考えられる。また、本評価では数十程度のマイクログリッドを対象として解を導出可能となっている。そのため、マイクログリッドの数や評価の日数等が極端に増加する場合、計算時間の観点で制約が発生すると思われる。一方、マイクログリッドにおける電力の供給量や需要量の値は、解を算出するための入力条件となっており、マイクログリッドごとに異なる値に対しても解の導出が可能と考えられる。

なお、単体としてのマイクログリッドが近年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、かつカラー電力の融通を行う運用の高度化段階において、充放電機能の配備位置決定や送電および充放電制御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、発電された電力に対して再生可能エネルギーにより発電された電力が否かを区別して管理 (電力をカラー管理) し、かつ電力の供給と需要のパターンが異なる状況において、充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、また送電および充放電による電力ロス量を削減する、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カラー電力 (RE100 電力と NRE 電力) を供給するにあたり、送電と充放電による電力ロス算出式を目的関数として最小化することにより、充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、および効率の良い充放電機能の優先利用が可能である。また、電力供給側マイクログリッドからカラー電力の供給を行い、需要側マイクログリッドにおいて消費する電力において、再生可能エネルギーにより発電された電力の割合 (RE 度) を指定した電力消費が可能である。

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、電力ロス量を最小化する充放電機能の最適な配備、送電制御、および指定した RE 度の電力消費が可能であることを確認した。提案方式 (Proposed method) と送電距離を最小化するように充放電機能を配備する方式 (Route-based method) [5] とを比較評価した結果、送電と充放電による電力ロス量が

20%以上改善されるという結果を得た。

今後は、個々のマイクログリッドにおいて、日々や季節等により動的に変動する太陽光や風力等による電力の供給や、家庭や工場等の多様な需要やRE度の要求に対応し、かつ長期間を対象として最適な充放電機能の配備や送電経路の制御が可能ない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、都道府県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: Sustainable Development Goals, available from (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>) (accessed 2021-08-02).
- [2] 内閣府: Society 5.0, 入手先 ([https://www8.cao.go.jp/cstp/society5\\_0/](https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/)) (参照 2021-08-02).
- [3] 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 2021-08-02).
- [4] 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).
- [5] 鈴木敏明, 正村雄介, 村田正幸: 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, 情報処理学会論文誌, Vol.62, No.1, pp.12–25 (2021).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] Takahashi, R., Tashiro, K. and Hikihara, T.: Router for Power Packet Distribution Network: Design and Experimental Verification, *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol.6, No.2, pp.618–626 (2015).
- [15] 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).
- [16] Javaid, S., Kurose, Y., Kato, T. and Matsuyama, T.: Cooperative distributed control implementation of the power flow coloring over a nano-grid with fluctuating power loads, *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol.8, No.1, pp.342–352 (2017).
- [17] Javaid, S., Kato, T. and Matsuyama, T.: Power Flow Coloring System Over a Nanogrid With Fluctuating Power Sources and Loads, *IEEE Trans. Industrial Informatics*, Vol.13, No.6, pp.3174–3184 (2017).
- [18] 大和製罐株式会社: 電池容量および充放電効率の劣化による蓄電システムの経済性低下について.No.15, 入手先 ([https://www.daiwa-can-ens.com/info/technology/column\\_0015](https://www.daiwa-can-ens.com/info/technology/column_0015)) (参照 2021-08-02).
- [19] 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, p.32, 入手先 ([https://www.chugoku.meti.go.jp/policy/seisaku/energy/research/pdf/h21\\_koikiblock\\_honpen\\_07.pdf](https://www.chugoku.meti.go.jp/policy/seisaku/energy/research/pdf/h21_koikiblock_honpen_07.pdf)) (参照 2021-08-02).
- [20] 株式会社三菱総合研究所: 定置用蓄電システム普及拡大検討会 第1回資料6: 今後の論点について, p.30, (2020.11.19) 入手先 ([https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/storage.system/pdf/001\\_06\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/storage.system/pdf/001_06_00.pdf)) (参照 2021-08-02).
- [21] 自然エネルギー財団: 国際送電網, 入手先 (<https://www.renewable-ei.org/activities/qa/ASG.php>) (参照 2021-08-02).



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。



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。