

<論文>

小規模電力系統(マイクログリッド)における発電機最適運転の検討

舟橋 俊久¹, 乙黒 ひとみ¹, 佐々木伸幸¹, 田邊 隆之¹, 鈴木 善起¹, 栗原 世治¹,
佐野 慎一¹, 奥野 義道¹, 星 靖之¹, 村上 英樹¹

株式会社明電舎 電力ソリューション営業技術部
(東京都中央区日本橋箱崎町 36-2 E-mail:funabashi-t@mb.meidensha.co.jp)

概要

新エネルギーを中心にした複数の分散型電源により、エリア内の負荷へ電力・熱供給を行う小規模電力系統(マイクログリッド)が最近注目を集めており、実用化に向けて種々の検証が始まっている。一般に系統内の発電機制御方法としては電力会社からマイクログリッドへの電力供給を一定量もしくはゼロとするようマイクログリッド内の発電機を制御する。そのため、まず翌日の需要予測および風力発電・太陽光発電の発電予測を行い、その予測結果に基づきコージェネレーションシステムや燃料電池などを含む発電機の運転計画を作成する。本論文では、マイクログリッド内の各種分散型電源の特性を考慮し、経済性・環境性が最大となるよう分散型電源の運転時間、ならびに負荷追従を行う分散型電源とその出力パターンを決定する手法を検討したので報告する。

キーワード: マイクログリッド, 分散型電源, 運転計画, 需要予測, 負荷追従

1. まえがき

分散型電源や負荷などを独立の小系統内に集中配置し、統合された形で効率よく運用する小さな系統(マイクログリッド)が提案され種々の研究がなされている¹⁾⁵⁾。

マイクログリッドとは、複数の分散型電源(電力貯蔵装置はオプション)と負荷(最終需要)等から構成される比較的小規模のオンサイト(需要家密着型)の電力(または電力と熱の)供給システムであり、システムの全体または一部を制御する制御装置を有する。多くの場合系統連系を前提とし、系統の異常時や料金高騰時などは独立運転も可能である。系統連系システムの場合、系統とは1~2点で連系し、系統に対して「良き市民」として振舞うことが求められる⁹⁾。それゆえ系統からの一定受電が一般的であり、通常は系統への逆潮流を禁止する設計がなされる。

マイクログリッドの利点として、

- ・電源や熱源を消費地の近傍に設置できるため、エネルギーの効率的な利用が期待できる。
- ・新エネルギーの導入により CO₂ 排出量の削減などの地球温暖化対策に貢献できる。
- ・電力系統からマイクログリッドへの電力供給を一定または指定した受電パターンに制御することによって電力系統の負荷平準化に寄与できる。
- ・経済性・エネルギー効率を考慮した運転計画により分散型電源を効率的に運用できる。

等があげられ、各方面で導入の機運が高まっている。

マイクログリッド全体の運用計画ならびに監視制御を行うためのシステムとしてマイクログリッド需給制御システムがある。

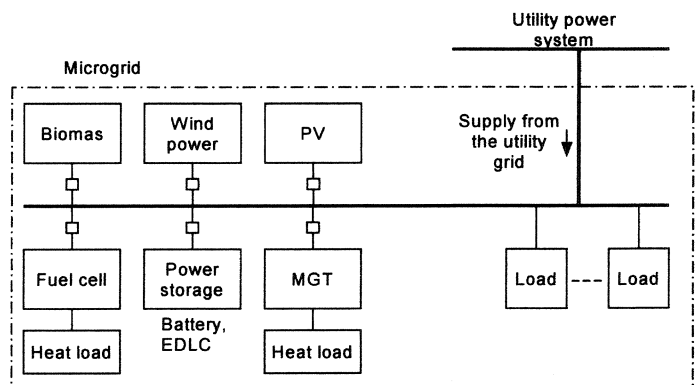
本論文では、マイクログリッド内の各種分散型電源の特性を考慮し、経済性・環境性が最大となるよう分散型電源の運転時間、ならびに負荷追従を行う分散型電源とその出力パターンを決定する手法を検討したので報告する。

2. マイクログリッドの需給制御

2.1 需給制御システムの目的

(1) 需給制御

Fig.1 にマイクログリッドの一例を示す。太陽光・風力・バイオマスなどの発電設備と負荷を小系統内に集中配置し、統合された形で運用する。分散電源設置区域の電力系統への電力供給を一定または指定した受送電パターンに制御することによって電力系統の負荷平準化に寄与する。Fig.2 にこのような需給制御の例を示す。



Biomass: バイオマス発電, PV: 太陽光発電, Fuel Cell: 燃料電池
EDLC: 電気二重層キャパシタ

Fig.1 An example of Microgrid.

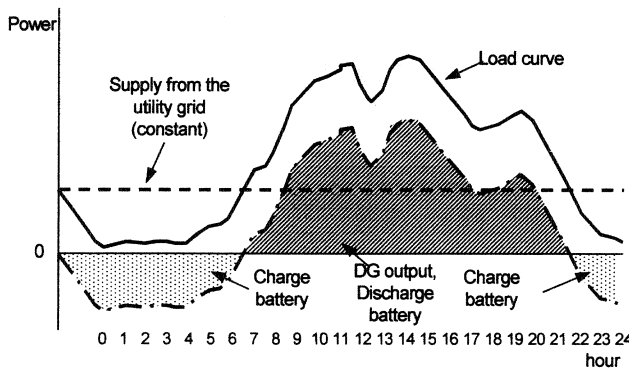


Fig.2 An example of supply and demand control.

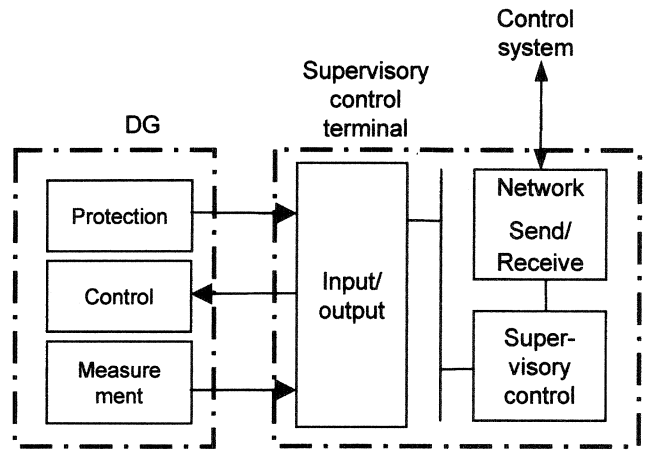


Fig.4 A block diagram of SC agent.

(2) 分散電源の効率運転

需給制御に対応する分散電源の運転計画を経済性、エネルギー効率を考慮して制御することによって分散電源の効率的な運用を実現する。

2.2 需給制御システムの構成

需給制御システムは、分散電源 (DG) 設置区域全体の運用・制御を行う (Control system) と各分散電源や負荷 (Load) の監視制御を行う監視制御端末 (SC terminal) で構成する。Fig.3 に需給制御システムの構成図を示す。

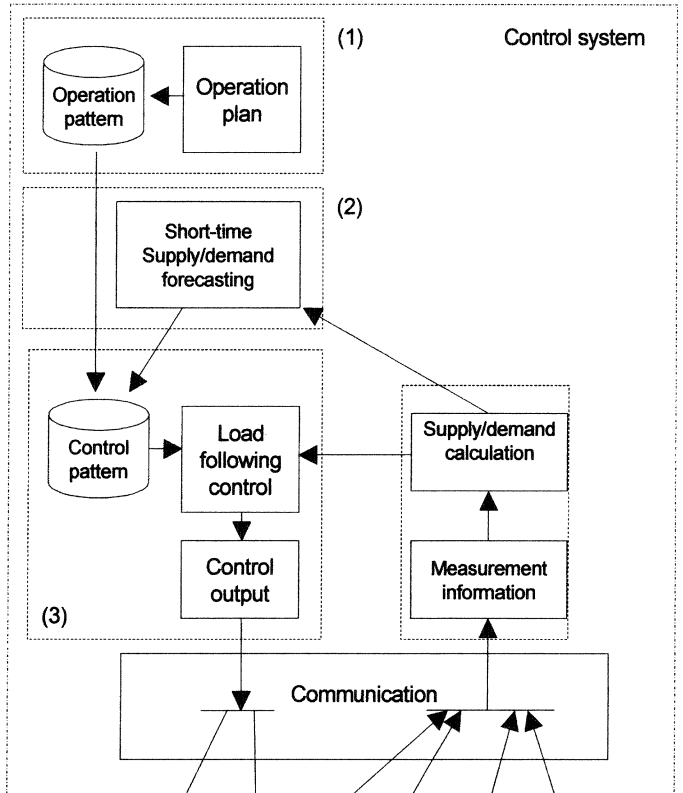


Fig.3 A block diagram of Microgrid control.

(1) 制御システム

分散電源設置区域内の電力・熱品質ならびに信頼性を確保して制御対象区域内の需給制御を行うコンピュータシステムである。

(2) 監視制御端末

分散電源設置箇所ならびに需要箇所に必要な計測項目、故障・状態表示を収集し、制御システムに送信する。また、制御システムから運転/停止、入/切、出力調整値などの制御内容を受信して出力する。Fig.4 に監視制御端末の構成を示す。SC-terminal における分散制御機能は Supervisory control の部分で行う。

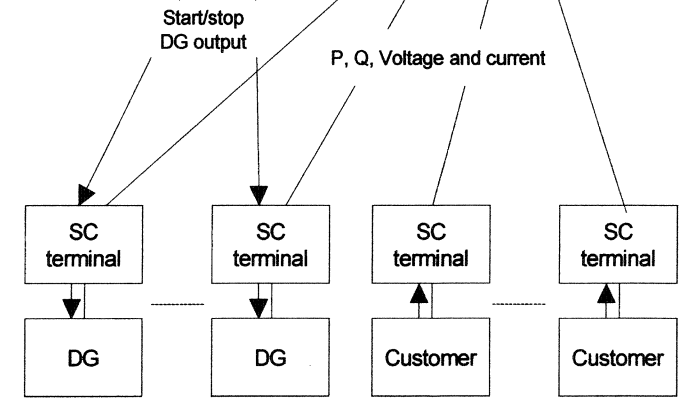


Fig.5 An outline of control method.

2.3 マイクログリッドの需給制御方式

電力系統からの供給パターンと予め予測した負荷需要パ

ターンから作成した分散電源の運転計画パターンに従って出力制御を行う。Fig.5 に需給制御方式の概要図を示す。

以下に、需給制御の個別機能について説明する。

(1)運用計画

文献(6)のアルゴリズムに基づき翌日の需要予測を行い、経済的かつ効率的な分散型電源の運転と予備発電力などの供給安定度を考慮した運用計画を作成し、分散型電源の運転時間ならびに負荷追従を行う分散型電源とその出力制御パターンを決定する。また、天候、風向・風力、日射量データなどから風力発電および太陽光発電の発電予測を行う。分散型電源の効率運転には熱需要も考慮する。

(2)短時間需給予測による運用計画の補正

運用計画により作成した運用パターンに対して現在需給量をもとに 15 分から 3 時間後の需給量を予測して負荷追従制御を行う出力目標値を補正し予測精度を向上する。アルゴリズムは文献(7)による。また、短時間需給予測の結果から負荷変動に対応する発電予備力が不足する場合には運用計画を補正する。

(3)負荷追従制御

運用計画による出力制御値ならびにリアルタイムの総需要電力と総発電電力から負荷追従出力調整値を決定する。制御系は二重ループを形成しており、内部制御ループでは発電電力、外部制御ループでは発電電力量を制御する。これらの制御性能は文献(8)のシミュレーションにより確認した。

3. 発電機最適運転計画の作成

3.1 電力・熱の需要予測

(1)入出力項目

電力・熱需要予測プログラムへの入力項目は、天気予報、現在外気温、カレンダー情報(特異日)、および電力負荷・熱負荷・自然エネルギー発電量の過去・現在値である。出力項目は電力・熱負荷および自然エネルギー発電の発電量の予測パターンである。データ入力・発電量予測はマイクログリッド単位で行う。

(2)需要予測方式

需要予測のフローチャートを Fig.6 に示す。過去の学習データにより学習済みのニューラルネットワークに対して、予測日の気温・負荷および類似日の気温・平均負荷のデータを入力して補正量を求め、この補正量を類似日平均負荷に加えて予測負荷を算出する。ただし台風や祝日等の特異日や急激な気候変化に対してはファジィ推論による補正を行う。

3.2 最適運転計画の作成

Fig.7 に最適運転計画のフローチャートを示す。

(1)最適の定義

任意の分散型電源を含むシステムの電源構成の下、そのシステムの電力負荷を複数の発電機で全て賅う 24 時間の最適運転計画運転パターンを計算する。

入力データは電力負荷パターン、自然エネルギー電源の出力パターン、発電・蓄電設備の台数、発電・蓄電設備特性(種類、定格出力、最小出力、運転コスト、起動特性、停止特性)などである。

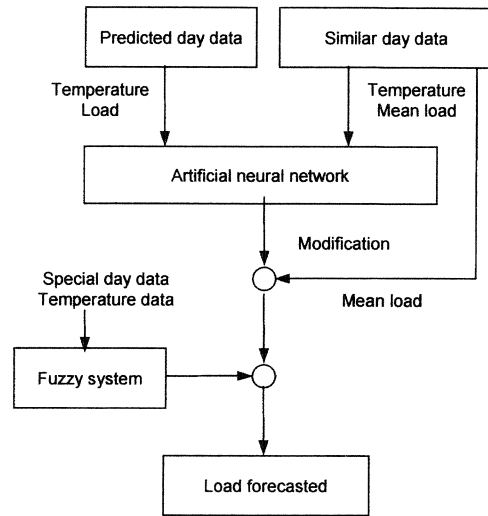


Fig.6 A flowchart of load forecast.

発電・蓄電設備の出力曲線、運転コスト(経済コスト・環境コスト)などの値を計算結果として出力する。

発電計画は、各発電機の特長、電力会社からの買電など全てを考慮し系統一括で実施する。計画範囲は与えられた電力負荷予測の範囲(総合計を満たす発電計画)で 1 時間おきに実施する。電力負荷は、P(有効電力)と Q(無効電力)に分けられる。発電機毎にあるP出力中にこれだけのQが出力できるという範囲が指定される。この範囲に基づき、P、Qを満たすような発電計画を立てる。

主な制約条件は以下のとおりである。

- ・(各発電機の発電電力の合計) + (電力会社系統からの買電電力) = (電力負荷予測値)
- ・電力会社からの買電価格は季節・時刻条件で変動する。系統の買電総量は契約電力を超えないように計画する。
- ・各発電機の定格出力を上回る運転計画、及び最小運転出力を下回る運転計画を行わない。
- ・各発電機に運転開始・停止所要時間を与えられないような停止/運転を繰り返さないように計画する。
- ・各発電機の起動/停止は、可能な限り少なくする。
- ・蓄電池の利用は時間毎に発電計画に参加させるか否かを選択できるようにする。
- ・各発電機の起動に要する時間を考慮し、起動命令時間を示す。運転開始に要する時間は、入力パラメータとして設定できるものとする。
- ・各発電機の出力調整範囲を逸脱しない発電を計画する。
- ・発電機単位に不稼動時間帯を設けられるようにする。
- ・発電機単位に指定時間指定出力を指定できるようにする(含む、買電)。指定していない場合は、最適解により出力を

決定する。

- 蓄電池を含む場合、入力として満充電(100%充電)を実施する時間帯を指定できるようにする。蓄電池の充電計画は蓄電池仕様に従い行うが、パラメータとして目標容量(kwh)は外部からも与える事ができるようにする。

- 計画の連続性を保つため、発電機運転状態の初期値を設定できるようにする。またこれは、設定しない場合もある事を考慮する。

- 計画の連続性を確保するため計算対象区間の両端は、前回、次の計算と重なるようにする。

目的関数は以下のとおりである。

- コスト最小化(コスト優先)/CO₂ 排出量最小化(CO₂ 優先)を実現する運転計画を行う。コスト優先/CO₂ 優先の指定は、割合(0:コスト優先~100:CO₂ 優先)を指定できるようにする。(例:コスト 80%, CO₂ 排出量 20%など)

- P主体で計画後、Qの予測が満たせる事を確認しQの発電計画を実施する。

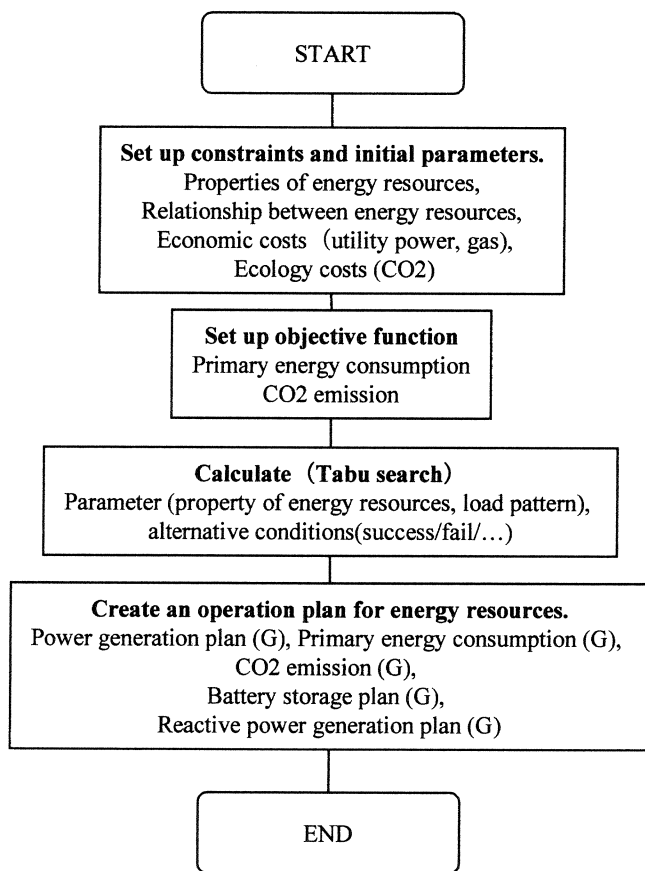


Fig.7 A flowchart of optimization process

(2)入出力項目

発電機最適運転計画プログラムへの入力項目は、需要家のスケジュール、過去・現在のマイクログリッドの状態(遮断器の入り切り、発電機の運転状態など)、過去・現在の負荷、過去・現在の天気、ガス、商用電力などの料金、発電機・負荷・熱機器の属性、発電機の運転戦略、および蓄電池の充放電戦略である。出力項目は全発電機の運転パターンであ

る。入力項目のうち、発電機の属性とは制御可能かどうか、オンオフ制御か出力値制御かなどの分類を示す。一般の発電機はガバナで有効電力を AVR で無効電力の制御が可能である。燃料電池は燃料量流量制御し、改質用蒸気、燃焼空気、CO 除去空気、セルスタック反応空気の各流量は燃料空気流量に一定比率制御され、これらの測定値からインバータ出力値が設定されるため出力値設定制御可能である。風力に適用される誘導発電機は独立して電圧発生不可能なため系統電圧存在下でオンオフ制御が可能である。太陽光発電はオンオフ制御のほか蓄電池と組み合わせ出力制御が可能である。

(3)運転計画作成方式

運転計画は、発電機の運転戦略、および蓄電池の充放電戦略に基づいて作成する。発電機の運転戦略とは、各発電機を、ベース電源・負荷追従用電源・自然エネルギー発電の3種に分けて運転することである。各電源種別の特徴は以下のとおりである。

- ベース電源: 運転コストが最小の発電機を選択し一定出力運転する。

- 負荷追従用電源: 上記ベース電源以外の電源であり、自然エネルギー電源を除く。コスト・信頼性・効率・電力品質・環境性などを目的関数として発電機の最適運転パターンを作成しそれに準じた運転を行う。

- 自然エネルギー発電: 風力に適用される誘導発電機と太陽光発電はオンオフ制御であり、負荷と同様に扱う(マイナスの負荷として予測する)。

蓄電池の充放電戦略は以下のとおりである。

- 負荷準化: ピークカットを行う(短周期の制御)。需要供給のタイムシフトを行う(長周期の制御)。

- 充放電回数の削減: 一日ごとのスタート・ストップとする。複数蓄電池を活用する。

(4)運転計画の変更

需要予測が大きく外れたときなどに計画を変更する。

3.3 本方式の特長

(1)出力の制御が困難な電源を含む系統の最適運転計画が可能

従来の方式では、運転計画を立てるに当たり、既設電源、既設熱源、外部制御回路を持たない電源・熱源、自然発電、自然熱源といった分散電源系統を一括して制御しているため、監視制御システムから出力の制御が困難な(またはオンオフ制御しかできない)電源は、最適な運転計画の妨げとなっていた。同様に、熱負荷への需要供給を最重点におくコージェネレーション発電機の熱主運転も、電気需要に対するの運転については、最適な運転計画の妨げとなっていた。

本方式では、これを以下のように解消している。負荷の需要予測は、一般的に過去現在の気温、カレンダー情報、電力熱負荷と天気予報から行い、これより電力熱の負荷パターンを予測している。これを用いて、応答速度の遅い電力熱リソ

ースの制御を先行的に制御し、円滑な需給制御を目指す。問題となっている各種発電・発熱リソースは、負荷と同様の方式で予測パターンを予め作成することが可能である。Fig.8に示すように予測した自然エネルギー発電パターンは負荷パターンから差し引き、その差分を残りの電力熱リソースが負担する負荷パターンとする。差し引いた結果がマイナスになってしまった場合は、充電・蓄熱または放電・放熱によって処分する。

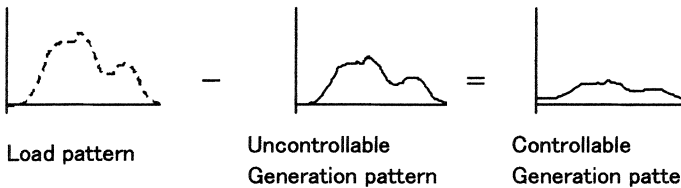


Fig.8 Calculation of controllable generation pattern

(2) 運転予備力を加味した最適運転計画が可能

従来の方式では、ある系統の電力負荷を、複数の発電機で全てまかなう計画を行うとしたとき、負荷予測に対し、与えられた発電機の定格容量で、各時間に対する発電機を割り当てていた。しかし、この方式では発電機選択の閾値付近で決定された運転計画に対し、負荷予測が少しでも一致しないと、発電不能状況を容易に生み出してしまふ欠点があった。

本方式では、これを以下のように解消している。各計画時間中の電力変化は、その指令発電量のm%内外ずれる可能性があるため、指令発電量の±m%範囲では発電機の停止や起動を伴わないように計画する。すなわち、その時間の負荷±m%の変化では、停止・起動しないように、発電機を裕度有る運転にしておく。mの値は時間帯により変化する。すなわち、時刻ごとに尤度を設定出来るようにする。また、上側尤度、下側尤度に分けて設定する。

(3) 蓄電池の多目的運用が可能

マイクログリッドにおいては、系統負荷として、電熱源の最大限の導入を目指している。分散電源系統(または、マイクログリッド)は環境負荷が小さいというメリットがある一方、出力変動が大きいというデメリットを有する。したがって、分散電源系統(または、マイクログリッド)の導入を行う際には、電気・熱の量・質の安定化に必要なコストを考慮して、分散電源系統(または、マイクログリッド)の電熱源の運転方法が重要となる。

このとき、マイクログリッドにおいては、蓄電池の役割が大きい。ユーティリティ系統と連系しているときの、蓄電池の役割は大きく次の2つの目的に用いられる。

- ・ピークカット(逆潮流防止)
- ・需要供給のシフト(上下限シフト, 時間シフト)

これらは、同時に制御することが望ましい。しかし、ピークカットは短時間(秒オーダー)で需要供給のシフトは経済・環境コストを加味した最適計画に沿って長時間(時間・日オーダー)

で制御する必要がある。逆潮流防止用に、蓄電池の容量をどれだけ必要とするかが不明なため、長時間の最適化演算にこれを組み込むことが困難であった。

本方式では、これを以下のように解消している。すなわち、次に述べる蓄電池の使用に関する条件を制御の制約条件に加え、最適化演算を可能とする。

自然エネルギー電源サイズ = $C \times [x]\%$ 、ただし、x: 自然エネルギー電源導入比率 とする。

① $x > 100$ の場合

・「逆潮流はない」という前提から、 $x > 100$ の可能性は排除される。

② $x \leq 100$ の場合

・蓄電池の利用は、xの水準に応じて増加するものの、単純に比例的な増加ではない。

・蓄電池の設置理由は、負荷が平均水準を下回って変動する際に、逆潮が発生しないよう、自然エネルギー電源が発電した電気を蓄電するためである。そこで、蓄電池の運転は、0~a%、a~b%、b~100%の3段階に分けて考える。

Fig.9に蓄電池の限界費用を示す。

(i) 0~a%の段階

・負荷が平均水準を大きく下回っても逆潮の可能性がないほど、自然エネルギー電源の規模が小さい段階である。(負荷パターンから自然エネルギー電源パターンを差し引いた結果が常に0以上のとき)

・この段階では、逆潮流防止のための蓄電池の利用は不要である。

・(aの値) = (負荷パターンの最下限) - (運転を強要されている固定出力運転の発電総量) - (運転を強要されている出力制御可能な発電機の最下限出力の総和) で求める。

(ii) a~b%の段階

・負荷が平均水準を下回ると逆潮の可能性のある段階である。(負荷パターンから自然エネルギー発電パターンを差し引いた結果、0よりも小さくなり、かつさらに分散電源の定出力運転分を差し引いた結果が0以上のときがあるとき)

・この段階では、逆潮流防止のための利用が必要である。

・このとき必要な蓄電池の容量は、xの水準に比例して増加する。

・(bの値) = (aの値) + (出力制御可能な発電機の変可出力の総和) で求める。

(iii) b~100%の段階

・この段階でも、逆潮流防止のための利用が必要である。(負荷パターンから自然エネルギー発電パターンと、さらに運転電源の定出力運転分を差し引いた結果、0よりも小さくなる時があるとき)

・このとき必要な蓄電池の容量は、xの水準に比例して増加する。比例定数は、(ii)の段階よりも大きい。

・(ii)の段階では、(正味の負荷変動) = (負荷変動) - (自然エネルギー発電の出力変動)を、蓄電池および出力制御可能電源の両方が吸収している。しかし、(iii)の段階で

は、稼働率（電源の運転可能域）の下限の問題で自然エネルギー発電の出力調整ができない。そのため、正味の負荷変動を吸収する役割はもっぱら蓄電池が果たすことになる。その結果、xの増分に対する比例定数が大きくなる。

・例えば、この段階では、好天の場合、長時間にわたり、負荷を上回る発電が行われる。それに対応するために、蓄電池は単に短時間の調整機能ではなく、数時間分の過剰発電を貯蔵して夕方以降に放電するだけの大容量が必要になる。

逆潮流防止に必要な蓄電池の容量を算出し、残った余力をパワーシフト、タイムシフトといったコスト重視運転へのリソースに利用が可能となる。

以上の方式をとることにより以下の効果が期待できる。

- ・太陽光発電・風力発電といった自然エネルギー電源に対する最小の蓄電池容量を求めることができる。
- ・最小容量以上の蓄電池が設置されているとき、それを上下限調整や時間調整をして、最適なコストでエネルギー供給が可能となる、蓄電池の余力基準値を与えることが可能となる。これにより、経済性・環境性を高める運転が可能となる。

(4)無効電力発電の計画が可能

従来の方式では、最適運転計画は、有効電力に対して計画され、無効電力が加味されていなかった。無効電力も有効電力と同様に、応答速度の遅い発電機器が制御対象となるため、予想される無効電力負荷予測に対しての最適運転計画が必要とされる。無効電力の出力可能範囲は有効電力の関数となり、発電電力リソースごとにその特性が異なる。それも加味しての最適計画は演算量が膨大となり現実的な演算が不可能であった。

本方式ではこれを以下のように解消した。発電計画は系統（マイクログリッド）一括にて実施する。各発電機の実特性、電力会社からの買電等全てを考慮し、一括で計画を行う。尚、計画範囲は、与えられた負荷予測の範囲で、一定時間おきに実施する（最大数月分程度とする）。予測された負荷（以降各負荷予測）の総合計を満たす発電計画を実施する。負荷は、P（有効電力）とQ（無効電力）に分けられる。発電機毎に、あるP出力中にこれだけのQが出力できるという範囲が指定される。この範囲に基づき、P、Qを満たすような発電計画を立てる。本来、各時間で出力可能なQの範囲はPの関数となるが、モデル簡略化のために以下のようにQの範囲を固定値（上下限值）とすることができる。これを電源特性データとして追加する。

- ・当該発電機が運転していない場合のQはゼロとする。（整数変数 δ_i の導入）
- ・予測結果Q_iが範囲に収まらない場合はQ_iの制約を緩めて再計算する。（係数 α の導入）
- ・解が求まるまで α を変更しながら下記条件を満たす最適解を計算する。

$$-\sum_i (\delta_i \cdot Q_{imin}) \leq Q_i \cdot \alpha \leq \sum_i (\delta_i \cdot Q_{imax})$$

・下記のようなスラック変数（目的関数の差し換えを行う）を導入することで計算時間を短縮できる。ただし、完全ではないので、この方式でガイドラインが示せれば良いと考える。

$$Q_{imin} - S1 \leq Q_i \leq Q_{imax} + S2$$

①S1とS2をゼロに固定する。

②S1 ≥ 0, S2 ≥ 0のもと、S1+S2を最小化する。

この方式をとることにより、Qを導入することによる計算時間は、最大でもPのみの場合の2倍ほどで、現実的な時間内の最適計画が実現可能となった。

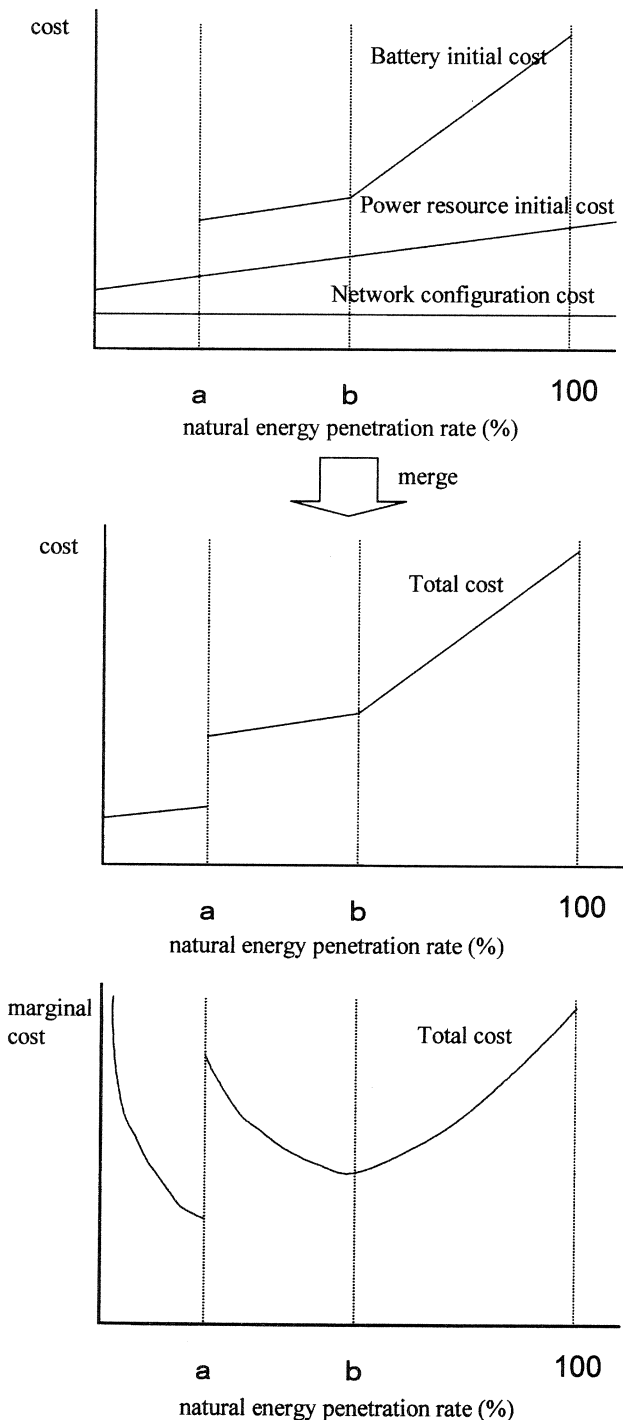


Fig.9 Battery marginal cost

この条件により、負荷予測値、自然エネルギー発電予測値から得られる逆潮流の可能性を上記3パターンに割り当て、

4.あしがき

本論文では、マイクログリッド内の各種分散型電源の特性を考慮し、経済性・環境性が最大となるよう分散型電源の運転時間、ならびに負荷追従を行う分散型電源とその出力パターンを決定する手法を検討した。ここで提案した手法により、従来は不可能であった下記の機能を実現できる可能性がある。

- (1)自然エネルギー電源を含む系統の最適運転計画
- (2)運転予備力を加味した最適運転計画
- (3)蓄電池の多目的運用
- (4)無効電力発電の計画

今後は、実フィールドにて提案方式を運用することにより、本方式の効果を確認する予定である。

参考文献

- (1) 舟橋 俊久・横山 隆一:「分散型電源と情報技術を活用した新しい電力供給システムの開発動向」, 電学論 C, Vol.126, No.2 pp.150-155 (2006)
- (2) 小島康弘・古塩正展・中村静香:「マイクログリッドの需給制御に関する検討」, 平成 17 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, 188 (2005)
- (3) 林泰弘・高野浩貴・松木純也・宮元英樹・齊藤文彦・東仁:「マイクログリッドにおけるオンライン電源運用最適化手法」, 平成 18 年電気学会電国大会, 6-044 (2006)
- (4) 中澤朗・竹内章・遠藤久仁:「愛・地球博」マイクログリッドにおける最適スケジューリング(1)遺伝的アルゴリズムの適用」, 平成 18 年電気学会電国大会, 6-052 (2006)
- (5) 竹内章・中澤朗・遠藤久仁:「愛・地球博」マイクログリッドにおける最適スケジューリング(2)タブーサーチの適用」, 平成 18 年電気学会電国大会, 6-053 (2006)
- (6) 千住智信・高良仁之・上里勝実・舟橋俊久:「分散型電源の運用に適した 24 時間先電力需要予測手法」, 平成 13 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, 分冊 A, pp.217-222(2001)
- (7) Tomonobu Senjyu, Hitoshi Takara, Katsumi Uezato, and Toshihisa Funabashi: "One-Hour-Ahead Load Forecasting Using Neural Network", IEEE Trans. Power Systems, Vol.17, No.1 pp.113-118 (2002)
- (8) 千住智信・高良仁之・上里勝実・舟橋俊久・伊藤孝充:「PI 制御器による分散型電源の負荷追従制御」, 電学論 C, Vol.122, No.8 pp.1333-1340 (2002)
- (9) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, (財)エネルギー総合工学研究所:「新エネルギー等地域集中実証研究に係る技術動向調査」平成15年度調査報告書,H16.3

