

太陽光発電と蓄電池を導入した街区の電力需給マネジメント

修了年月 2019年3月環境システム学専攻 47-176664 北沢雅光
指導教員 吉田好邦 教授

キーワード：電力需給、最適化、不確実性、確率 DP、太陽光発電、蓄電池

1. はじめに

東日本大震災から、エネルギーシステム改革の必要性が高まり、電力自由化が進められている。しかし新電力の事業者には系統電力のバックアップに支えられていること、電力価格が下がっていることなど、課題が多くある。電力自由化によるエネルギーシステムの改善にはこうした地域の電力事業者の発展を後押しが必要となる。

本研究では太陽光発電を導入した街区 K の電力事業計画に着目し、天候や需要の不確実性の下で確率 DP を用いた電力需給のコスト最小化モデルの提案を目的とする。モデル構築にあたっては、不確実性を考慮しない厳密な最適解を導出できる濱田 [1] と計算結果を照らし合わせながら行う。不確実性によりばらつく計算結果を吟味して、不確実性対応力と正確性の両方を兼ね備えた新しいマネジメントを提案する。

2. データと手法

2.1. 街区 K とデータ

街区 K の電力事業とはある大学を中心とした 7 つの公共施設を自営線により連携したものである。事業に際しては太陽光発電設備や蓄電池の分散配置が導入されている。データとして利用しているものは、前節で示した 7 施設の電力需要量、太陽光発電設備の発電量、蓄電池の容量である。データの期間は 2016 年の 1 年間である。天候のデータにおいては、街区 K で得られたデータ一日の天候は気象庁 [2] のものと照らし合わせて決定している。データ分析の点では、晴れ、曇り、雨、それぞれの天気に対して、平均どれくらい発電するのかを求め、それを天候予測の指標とした。それを表す図を図 2-1 に示す。

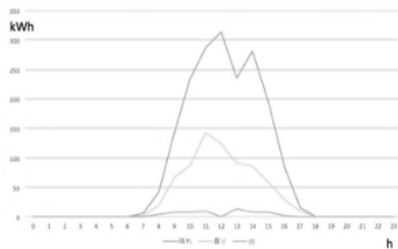


図 2-1. 天気ごとの平均太陽光発電量

2.2. 確率 DP

電力需給の将来予測において、状態推移は確率的なものとなる。確率 DP はそこに多段階の期待値計算を組み込み、最適化する手法となる。その構造を表す図を図 2-2 に示す。

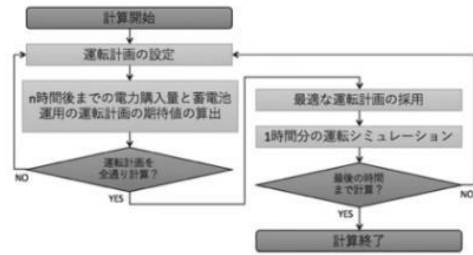


図 2-2. 本研究における確率 DP の構造

まずはどこまで将来予測するかを n 時間後の n を設定する。それから電力購入量や蓄電池の運用において n 時間先までの全通りを計算し、期待値が最大となる運転計画を採用する。一時間シミュレーションした後、また n 時間後先までの期待値計算をする、という動きを繰り返して運転計画を更新していく。

3. 電力需給モデル

3.1. 需要の回帰分析

需要の分析においては、計量経済分析ソフト Eviews を用いて AR モデルで行った。採用した式 (3-1) を以下に示す。

$$E = AR(1) + AR(2) + AR(48) + AR(49) + AR(50) + AR(336) + AR(337) + AR(338) \quad \text{式 (3-1)}$$

E が当該時刻の電力需要であり、AR(1) が 30 分前の電力需要である。

3.2. 最適化型モデル

天候が既知である場合のコスト最小の解を求める為の最適化型のモデルは、濱田 [1] のものを用いている。最適化型におけるモデルの概要の図を図 3-1 に示す。



図 3-1 最適化型モデルの概要

図 3-1 のように電力の供給源は太陽光発電設備、系統電力(以降、系統とする)、卸取引(以降、卸とする)である。そこで得られた電力を定置型蓄電池で充放電しながらコントロールし、需要家に電力を供給する。最適化型の構造を述べるにあたり、目的関数を示す。

Objective Function:

Maximum $P_{tot} = R_{tot} - C_{tot}$ 式(3-2)

P_{tot} は収益、 R_{tot} は売り上げ、 C_{tot} は費用である。需要を満たす分の電力を売り上げ、電力調達分を費用として計算している。本質的にはコスト最小化のモデルと同じである。さらにモデルの基礎となる制約式を示す。

$G_{BU}(t) \leq (H_{kW} \times 0.25 + L_{kW} \times 0.1) \times 1/2$ 式(3-3)

式(3-3)は系統からのバックアップ電源調達の制約式である。一般電力事業者から電力を安く仕入れられる量には制限がある為である。 G_{BU} がバックアップの調達量、 H_{kW} が高圧の容量、 L_{kW} が低圧の容量である。プログラムの構造はこのような需給の制約を満たした状態で収益が最大となるように、系統や卸、太陽光発電、蓄電池から最適に電力供給をする。

3.3.不確実性対応型モデル

著者が作成した不確実性対応型モデル(以降、不確実性対応型とする)について述べる。モデル概要における設定として、電力の供給サイドに卸、系統、太陽光発電があり、蓄電池でコントロールする構図というのは図 3-1 と同様である。なお、本プログラムは C++により記述している。不確実性対応型は「卸への注文量の決定」「今後の太陽光発電量の予測」「蓄電池や電力購入量などの今後の処理を決める」の3ステップにわかれる。卸の注文量の決定の仕方に関する図 3-2 を以下に示す。

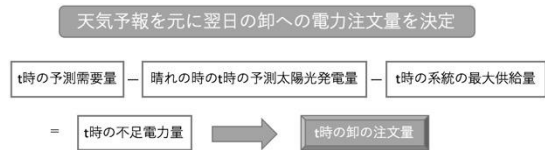


図 3-2. 不確実性対応型の卸取引の注文量 t 時は分析の対象となる時刻を表し、予報は晴れであった例を掲載している。まず前提として、卸の電力の注文は前日までに行わなければならない。そのため蓄電池の運用計画の前に、最初に注文量を決定する。注文量の決定にあたり、予測太陽光発電量の計算を行う。まず気象庁の天気予報[2]によって、対象の日の天気を晴れか曇りか雨に分類する。晴れの日の予測太陽光発電量は得られたデータ1年

分を気象庁の天候のデータ[2]と照らし合わせて、晴れ、曇り、雨、ごとに平均をとったものである。加えて、1日の1時間ごとの需要は、各日の1時間ごとの電力需要を365日について平均することで求めた。系統の最大供給量は1800kWhが1時間の電力注文量の限界値であった為、系統から電力注文をする際の上限の値として用いた。街区Kの電力事業における電力の調達方法は、太陽光発電、系統からの購入、卸からの購入、蓄電池からの放電があるが、翌日の当該時刻の蓄電量は予測が難しい為、太陽光発電と系統の供給に注目する。その二つが枯渇した時点で、需要を補えていなかった場合、不足電力量として残る為、その分を卸に注文する構造である。図 3-2 の不足電力量の値が0以下になった場合には注文は行わない。次に今後の太陽光発電量の予測に関する図を図 3-3 に示す。

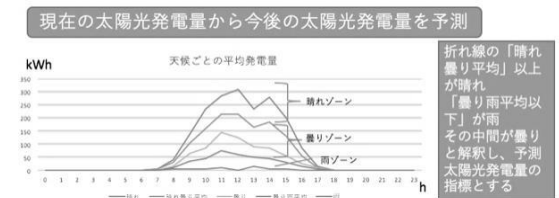


図 3-3. 不確実性対応型モデルの今後の太陽光発電量の予測

図 3-3 の折れ線はそれぞれ、晴れ、晴れ曇り平均、曇り、曇り雨平均、雨の5つに分かれている。晴れは前述した1年間の中で気象庁が晴れとした全ての日の平均である。晴れ曇り平均というのは、その晴れの値と曇りの値の2つのさらに平均したものである。そうして当該時刻の太陽光発電量が、晴れ曇り平均より大きかった場合には、晴れ予想ということで今後は晴れ時の太陽光発電量が得られると解釈する。同様に曇り雨平均より当該時刻の太陽光発電量が少なければ、雨予想として今後も雨の時の太陽光発電量が得られるとする。中間の時は曇りである。

以上2つのステップによって卸の注文量と、24時間後までの太陽光発電量を推定した。最後に当該時刻の運用計画を決める。その為にまず、現在と将来を分けて考える。将来はn時間後として設定し、現在とn時間後で別々の処理を行うものとする。説明の便宜上、以下に式(3-4)、式(3-5)、式(3-6)、式(3-7)を示す。

現在の太陽光発電量 + 現在の卸供給量 = 現在の供給電力量 (=A) 式(3-4)

現在の電力需要 (=B) 式(3-5)

n 時間後迄の太陽光発電量 + n 時間後迄の卸供給量 + 蓄電量 = n 時間後供給可能電力量 (=A') 式(3-6)

n 時間後迄の電力需要 (=B') 式(3-7)

これらを踏まえて、現在への処理と n 時間後の為の(現在の)処理を図 3-4 に示す。



図 3-4. 不確実性対応モデルにおける現在と n 時間後の処理

図 3-4 は現在と n 時間後の処理をツリー状にして表したものである。1番左は現在においても n 時間後においても供給が需要を上回っている、すなわち電力が足りている場合である。この場合需要を満たして余った電力は充電する。蓄電池が上限に到達した場合は、余った電力は破棄する。

左から 2 番目は現在は需要より供給が大きく、 n 時間後は供給より需要の方が大きいパターンである。現在の処理は 1 目目のパターンと同様に充電する。 n 時間後には電力が不足してしまうため、需要合計から供給合計を除いて、残った分を系統から購入する。蓄電池が上限に達するもしくは、系統の購入量が上限に達した場合、電力購入を終了する。

左から 3 番目は現在は需要の方が供給より大きく、 n 時間後は不足していないパターンである。 n 時間後の処理は必要ない。現在の処理は、需要から供給を除いて足りない分に関して、系統からの購入、蓄電池の順に対応し、それでも足りなかった分はインバランスとして対応する。

左から 4 番目は現在においても n 時間後においても供給が不足しているパターンである。順序が関係ある為、現在から将来へと順に処理する。まず現在においては供給できる電力、すなわち、太陽光発電と卸からの電力を使い切ったのち、系統からの購入、蓄電池の放電、インバランスの順に対応する。その次に n 時間後について処理する。しかし、現在の処理でインバランス発生まで行ってしまった場合、系統から電力を上限まで購入してしまっていることから、 n 時間後に対してできる現在の操作がな

い為、そのまま次の時間へ移る。現在の処理で系統からの購入までであった場合、 n 時間後の不足分まで電力を購入する。不足分を全て購入する前に、系統の購入上限に達するもしくは蓄電池が一杯になってしまった場合、電力購入を終了する。現在の処理が蓄電池の放電までであった場合も同様に、系統からの電力購入を行う。不足分を購入する、購入上限に達する、蓄電池が上限に達するのいずれかの条件を満たすと電力購入を終了する。

4. 電力需給のマネジメント

4.1.2つのモデルの結果

不確実性対応型においてプログラム内部が供給を用いてどのように電力需要を賄っているかを見た。それを表した図を図 4-1 として示す。

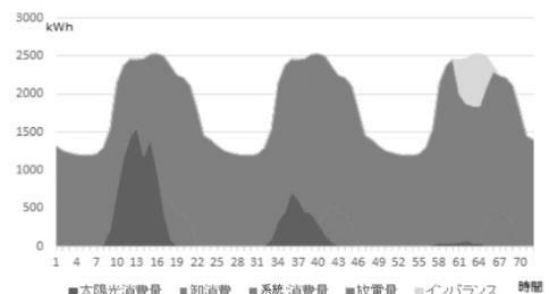


図 4-1.不確実性対応型モデルにおける晴れ予報の供給の積み上げ式内訳 (実天気において1~24時が晴れ、25~48時が曇り、49~72時が雨のもの)

太陽光発電量が電力需要を上回ることがなく、太陽光から蓄電することがないため、供給の合計がそのまま電力需要となる。晴れの日が太陽光発電量が多く雨の日は少ない。天候が悪くなるほど、系統と蓄電池で電力需要に対応しきれなくなり、インバランスが発生している。いずれの日においても多くの割合を系統からの電力購入で賄っている。続いて2つのモデルの総コストを比較した図を図 4-2 に示す。

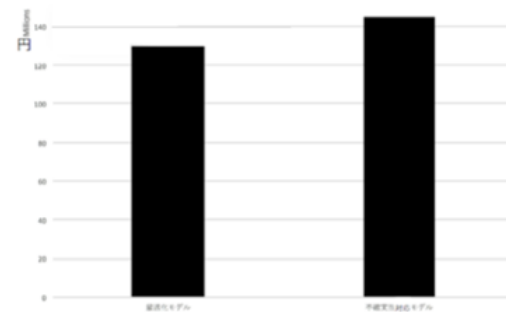


図 4-2. 2つのモデルの1年間総コストの比較 合計額は最適化型が 129.8 百万円、不確実性対応型が 145.0 百万円であった。不確実性

対応型の方が 11.6%多くコストがかかる。一方で、不確実性対応型は実世界の天気の変化にも対応できるという長所をもつ。

4.2. 感度分析

感度分析にあたり、リスクの高い日である、太陽光が急減する日を抽出した。その日を天気急変日として予測時間 n に対しての感度分析に用いた。予測時間 n を天気急変日のコスト計算に用いた場合の図を図 4-3 に示す。

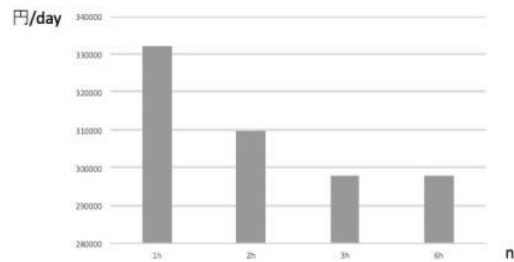


図 4-3. 天気急変日の予測時間 n とコスト結果は 1h が 33.2 万円/日、2h が 31.0 万円/日、3h から 6h ままでが 29.8 万円/日であった。3h 以上は全て同じ値であるため、3時間先まで予測に含めればリスクヘッジはできていると考えられる。次に需要が変動した際の感度分析を行う。まずは電力需要が変動した日の選択方法であるが、式(3-1)による予測をもとに、より予測より上ぶれた日を選択した。電力需要が多い日における、コストとの関係性を示した図を図 4-4 に示す。

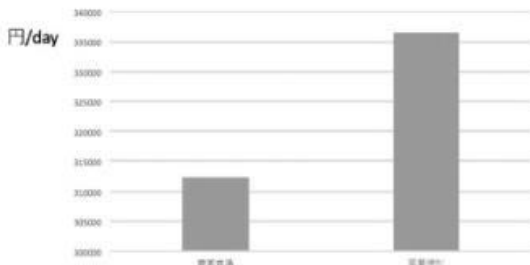


図 4-4. 電力需要が予測値の場合と多い場合におけるコスト比較 (需要普通は需要が AR モデルによる予測値のもの、需要増加は実際値)

電力需要自体が 5.9%増加なのに対して、コストは 7.7%と増加という結果であった。続いて需要が予測より多い日に対し蓄電池容量を増やした時のコストを表した図を図 4-5 に示す。

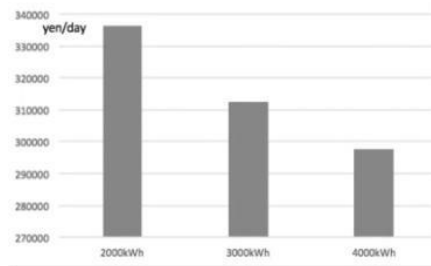


図 4-5. 需要が予測より増加した日に対する蓄電池容量ごとのコスト

容量 4000kWh にした場合、2000kWh と比較して 11.5%のコスト削減であった。図 4-4 では需要増加 5.9%で、コスト増加 7.7%という結果であったが、それに対して蓄電池容量を大きくすることで対応可能であることがわかった。

5. 結論

両モデルにおける一年間のコストの比較では、最適化型に対して不確実性対応型のコストが 11.6%多い値となった。感度分析においては、電力需要が予測より最も多い日を抽出して検証を行った。結果は電力需要が 5.9%増加なのに対して、コストは 7.7%の増加であった。しかし蓄電池容量を 2000kWh から 4000kWh に大きくすることで、コストは増加したところから 11.5%減少する。蓄電池容量においては、容量を増やすことでコスト減少の余地があることがわかった。

本モデルは太陽光発電量の変動に対して、不確実性を加味したままコストの増加を抑えたものとなっている。需要の変動に関しては、発電資源が少ないと対応できない面もあるが、蓄電池の容量を増やすことでコストを抑えられることを示した。今後の課題には、天気の細分化することや実際の運転に関する初期投資などのデータを含めることが挙げられる。

参考文献

[1] 濱田朋宏(2017)「地域電力事業者の運用改善のための蓄電資源導入に関する研究」東京大学大学院工学系研究科 2017 年度修士論文

[2] 国土交通省気象庁(2016)過去の気象データの検索

<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/select/prefecture00.php>