

# 分散型電力ネットワークにおける確率計画法に基づく電力運用計画最適化 Power Planning Optimization of Distributed Power Network based on Stochastic Programming

立命館大学 ○ 佐藤優馬, 瀬尾昌孝, 西川郁子  
Y.Sato, M.Seo and I.Nishikawa  
Ritsumeikan University

**Abstract** This paper focus on the optimal plan for efficient power usage in distributed power network. The distributed power network is composed of multiple homes with a storage battery and a PV unit, and also each house is able to transfer, store and purchase the power. Then, under the situation where power generation and power demand are uncertain, we obtain the most efficient power scheduling of the power transfer, storage and purchase by stochastic programming model. Numerical calculation shows the effectiveness of the distributed power network.

## 1 はじめに

太陽光発電では単一の設備から発電される電力量が少なく、発電量が天候に依存し制御が困難であるという問題がある。その対策として、電力の需要家が太陽光パネルを持ち、発電家として互いに電力を融通する分散型のネットワークが検討されている。著者らはこれまでに、発電と蓄電機能を有する複数の一般家庭から構成されるネットワークを想定し、線形計画法を用いて各家庭の最適な買電、融通、充放電計画を求めた [1]。その際の評価指標は対象期間における系統からの買電量を考えた。また、発電および消費量の不確定性を考慮し、発電、蓄電機能を有する単一家庭における効率的な電力利用計画を、複数のリコース変数を導入した2段階確率計画法を用いて求めた [2]。本稿では、分散型電力ネットワークにおける最適運用計画を複数のリコース変数を導入した確率計画モデルで定式化し、電力融通の有無による効率性の違いを実データを用いた数値計算を行い検証した。

## 2 分散型電力ネットワークの数理モデル

本節では、既提案 [1] の線形計画モデルを示した上で、新たに提案する確率計画モデルへ拡張する。

### 2.1 線形計画モデル [1]

発電、蓄電、消費機器をもつ複数の一般家庭が接続された電力ネットワークを考える。消費機器への電力供給は、まず太陽光発電電力から行い、不足した場合は蓄電池からの放電や他家庭からの融通で補う。それでもなお不足した場合は系統電力から買電する。逆に、消費を超えて余剰となった電力は蓄電池への充電や他家庭への融通を行い、それでも余剰となる場合は無駄電力として捨てられる。ここでは、系統電力網への逆潮流は考えないものとする。

$N$  軒の家庭で構成されるネットワークの数理計画モデルを記述するにあたり以下の変数を導入する。

- 時刻  $t$  ( $t = 1, \dots, T$ )
- 家庭  $H_i$  ( $i = 1, \dots, N$ )

ここでの離散時刻は電力制御を行うタイミングを表し、 $T$  は最適化対象期間に相当する。

次に、家庭  $H_i$  の蓄電池特性として以下を与える。

- 充電時の変換効率  $\alpha^X$

- 自然放電によるロス後の単位時間あたりの残存率  $\alpha^{XT}$

さらに家庭  $H_i$  から  $H_j$  への電力融通における効率を  $\alpha_{ij}$  とする。 $\alpha_{ij}$  は家庭間の距離に応じて値を設定する。

発電、消費量に応じて、各家庭がいつ、どれだけの電力を買電、融通、充放電するとネットワーク全体として最も無駄なく電力を利用できるかを考えるため、決定変数は各時刻  $t$  に対して

- 系統電力からの買電量  $u_{it}$
- 家庭  $H_i$  から  $H_j$  への融通量  $y_{ijt}$
- 蓄電池への充放電量  $x_{it} \equiv x_{it}^O - x_{it}^I, (x_{it}^O, x_{it}^I \geq 0)$

とし、その決定に応じて、以下は従属的に決まる。

- 他の家庭への融通量  $y_{it}^F$
- 他の家庭からの融通量  $y_{it}^T$
- 他の家庭からの送電・変電ロスを減じた融通量  $y_{it}^{TA}$
- 充電量  $x_{it}^I$ , 放電量  $x_{it}^O$
- 蓄電池残量  $X_{it}$
- 無駄電力量  $V_{it}$

各家庭、各時刻の発電量  $s_t$  および消費量  $d_t$  を既知としたとき、以下の需給均衡を表す等式制約が成立する；

$$u_{it} + s_{it} - d_{it} + x_{it}^O - x_{it}^I - V_{it} + y_{it}^{TA} - y_{it}^F = 0. \quad (1)$$

式 (1) の他に蓄電池残量の更新式、蓄電池容量上限、充電および放電量の上限、電力融通の制約を加える。これらの制約下で、最小化すべき目的関数を次式に示す；

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \{u_{it} + \varepsilon(y_{it}^T - y_{it}^{TA}) + \varepsilon(1 - \alpha^{XT})X_{it}\}. \quad (2)$$

第1項は系統電力からの買電量、第2項は家庭間の電力融通によるロス電力量、第3項は蓄電池での自然放電によるロス電力量をそれぞれ表す。第2項と第3項は電力余剰時の無駄電力を”融通によるロス”と”自然放電によるロス”のいずれかで処理するかの任意性を解消するために加えた微小項であり、 $\varepsilon$  は微小係数である。第2, 3項を加えることで距離が近い家庭間で融通し、過剰な蓄電を避ける解が選ばれる。

## 2.2 確率計画モデル

前節では、発電量  $s_{it}$  および消費量  $d_{it}$  を既知としていたが、それらは本来不確定な値であり、線形計画モデルでは不確定性を考慮した運用計画を取り扱えない。そこで発電量および消費量を既知の確率分布  $\Omega(\omega)$  に従う確率変数  $s_{it}(\omega)$ 、 $d_{it}(\omega)$  であると仮定し、確率計画モデルへ拡張することで不確定性を考慮するアプローチが考えられる。このとき、 $s_{it}(\omega) - d_{it}(\omega)$  が確率的に変動することで、式 (1) の等号制約を満たせない場合があり、その需要と供給の差異（電力の供給不足、あるいは、供給過剰）をなんらかの行動によって埋める必要がある。そこで、制約違反量を表すリソース変数  $v_{it}(\omega) \equiv v_{it}^+(\omega) - v_{it}^-(\omega)$ 、 $(v_{it}^+(\omega), v_{it}^-(\omega) \geq 0)$  を導入する。 $v_{it}(\omega) > 0$  のときは時刻  $t$  における供給不足を賄う買電リソース  $v_{it}^+(\omega)$ 、 $v_{it}(\omega) < 0$  のときは供給過剰により生じる無駄電力リソース  $v_{it}^-(\omega)$  とする。さらに、リソース変数  $v_{it}(\omega)$  に加え、需要と供給の差異を充放電によって埋める第2のリソース変数  $\xi_{it}(\omega) \equiv \xi_{it}^+(\omega) - \xi_{it}^-(\omega)$ 、 $(\xi_{it}^+(\omega), \xi_{it}^-(\omega) \geq 0)$  も新たに導入する [2]。 $\xi_{it}(\omega) > 0$  のときは時刻  $t$  における供給不足を賄う放電リソース  $\xi_{it}^+(\omega)$ 、 $\xi_{it}(\omega) < 0$  のときは供給過剰を処理する充電リソース  $\xi_{it}^-(\omega)$  とする。これにより式 (1) は以下のように変更される；

$$u_{it} + s_{it}(\omega) - d_{it}(\omega) + X_{it}^O - x_{it}^I - V_{it} + y_{it}^{TA} - y_{it}^F + v_{it}(\omega) + \xi_{it}(\omega) = 0. \quad (3)$$

また、蓄電池容量や単位時間当たりの充放電量の上限も、充放電リソース  $\xi_{it}^{\pm}$  を含めた不等式制約となる。

最後に目的関数は、前節の式 (2) に加えて、買電リソース  $v_{it}^+(\omega)$ （に充放電リソースによる自然放電の微小付加項を加えたもの）の最小値の期待値  $E_{\omega}[\cdot]$  を加算したもので与えられることになる。なお、ここでも決定変数  $u_{it}$  による買電と、確率変数の実現ごとに異なる買電リソース  $v_{it}^+(\omega)$  のいずれに含めるかの任意性が残るため、数値解を一意に得るために、リソースによる期待値項に僅かに重み付けし、前者が最大となる解を選ぶ。

## 3 数値計算

他家庭への融通が行える確率計画モデルと行えない確率計画モデルの最適解を比較し、電力融通の有無による効率の違いを確認する。

### 3.1 実験設定

最適化対象期間を1日とし、期間を離散的に30分毎に離散的に制御するため、 $T = 48$  とする。また、家庭数  $N$  は簡単化のために  $N = 2$  とした。次に、発電  $s_{it}(\omega)$  および消費  $d_{it}(\omega)$  の時系列には、2軒の家庭の実測データを用いる。家庭1は1日の総消費量が多く、昼間に消費のピークがある。他方、家庭2は1日の総消費量が少なく、夜間にピークをもつ。その上で、2軒の消費時系列にはそれぞれ2つの可能性があり、いずれも確率0.5で発生するものとした。また、発電には発電量の多い晴天日データを用い、2軒で共通の確定値とした。モデルの各パラメータは、 $\alpha^X = 0.7$ 、 $\alpha^{XT} = 0.99$ 、 $\alpha_{12} = 0.90$  とし、蓄電池容量上限は両家庭とも4[kWh]とした。

### 3.2 実験結果

Fig. 1 に、融通が行えない場合の家庭2の各時刻における蓄電池残量（リソースによる充放電も加えた合計）の期待値、および、無駄電力の期待値を示す。Fig. 2

に、融通が行える場合の結果を示す。ここでは、蓄電池残量と無駄電力に加え、他家庭への融通量  $y_{2t}^F$  も示されている。

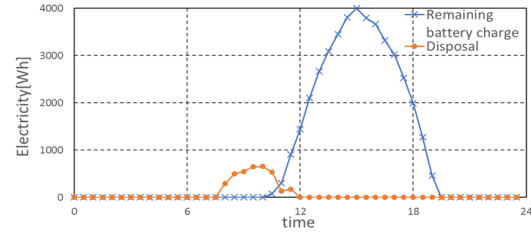


Fig. 1: Remaining battery charge and disposal at H<sub>2</sub> over a day (networks without transfer)

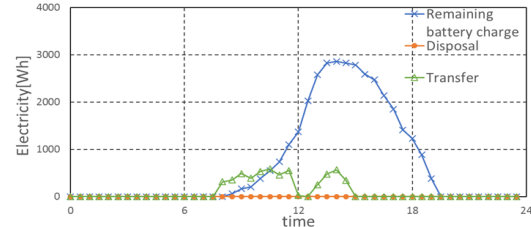


Fig. 2: Remaining battery charge, disposal and transfer at H<sub>2</sub> over a day (networks with transfer)

これらの図より以下のことがわかる：

- 融通が行えない場合は、家庭2の消費量が少なくて余剰電力が多くなり、蓄電池残量が上限に達し、無駄電力として捨てる量が多くなる。しかし、融通を行うことでその捨電が解消されている。
- 蓄電を減らし、その電力を融通に割り振ることで、蓄電による電力ロスが減っている。

以上により、電力利用の効率化を図る。

Table 1 に、両家庭の融通が行える場合と行えない場合の買電量（リソースでの買電も含めた合計）、および、無駄電力の期待値  $E_{\omega}[v_{it}^-(\omega)]$  の期間全体の総和を示す。

Table 1: Comparison of the optimal solutions obtained by networks with and without transfer [Wh]

|                           | Purchase | Disposal |
|---------------------------|----------|----------|
| networks without transfer | 32897    | 6294     |
| networks with transfer    | 30538    | 4121     |

上記の例のように家庭間に消費量の差がある場合には、電力融通を行うことで、買電量と無駄電力量が2[kWh]ほど削減されることがわかった。

## 4 おわりに

発電と蓄電機能を有する家庭が、互いに電力を融通できるネットワークにおいて、不確定性を考慮した最適運用計画を求めた。本稿では特に、電力融通の有無による効率性の違いを比較した。今後は、家庭間での電力取引における最適な価格決定を検討してゆきたい。

## References

- [1] 鈴木将義, 榊原一紀, 西川郁子: 電力融通ネットワークに対する線形計画モデルを用いた効率の解析と感度分析, 電気学会論文誌 C, Vol.136, No.10(2016)
- [2] 佐藤優馬, 瀬尾昌孝, 榊原一紀, 西川郁子: 確率計画法を用いたHEMSにおける買電・蓄電スケジューリング, 電気関係学会関西連合大会 (2016-11-22)