

電力ネットワーク上の融通と蓄電による電力利用効率化

Efficient power usage by the transfer and the storage on a power network base on LP model

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 Effective usage of the power is analyzed as an optimization problem by linear programming (LP) model. Power network composed of multiple houses is considered, which enables the power transfer among houses. Each house is equipped with a rechargeable battery and a PV unit, which enables the power storage and generation, respectively. Then, the optimal scheduling of the transfer, storage and the purchase from a utility company is obtained by LP. Two types of objective functions are considered, that is, the minimal power supply from the utility, and the minimal electricity bill under a time dependent electricity unit price. The computer experiments show the different types of optimal schedules, including the peak shift for minimization of the bill.

1 はじめに

火力発電や原子力発電といった大規模かつ集中的な発電方式のみに頼らず、再生可能エネルギーを用いた分散的な発電方式の有効利用が検討されているが、後者は、発電量や発電時間帯を消費に合わせて変えることが困難である。本報告では、太陽光パネルを持ち発電もできる一般家庭が、互いに電力を融通できる電力ネットワークで結ばれ、さらに、蓄電池により一定量の蓄電もできる状況を考える。同時刻での家庭間の電力融通と、発電と消費の時間差を可能にする蓄電を組み合わせることで、できるだけ効率的な電力利用を目指す。ここでの効率として、系統電力からの買電量の最小化、および、買電に伴う電気料金の最小化を考える。特に後者は、電力利用のピークシフトや夜間電力の有効利用のために安価に設定される夜間電力料金を想定した。いずれにも、既提案 [1, 2] の線形計画モデルを用いて利用計画を導出する。

2 電力ネットワークにおける融通最適化

本節では、既提案 [1] の線形計画モデルや評価指標などを示した上で、新たに考察する電気料最小化の目的関数を説明する。

2.1 電力融通ネットワーク

複数の家庭が接続された電力ネットワークを考える。各家庭は、電力消費機器のほかに太陽光パネル、蓄電池を持っているとする。発電や消費の規模や時間パターンが異なる複数の家庭が、余剰電力を互いに融通する。

消費機器への電力供給は、まず太陽光パネルから行い、不足した場合は他家庭からの融通または蓄電池からの放電で補い、なお不足した場合は系統電力から購入する。逆に、発電により余剰電力が発生した場合には、蓄電池への充電や他家庭への融通を行い、それでも余剰がある場合は無駄電力として不要な電力消費で放電する。ここでは、系統電力への売電は行わないとする。

2.2 基本要素と決定変数

N 軒の家庭で構成されるネットワーク上での電力の流れを記述するために、以下の変数を導入する：

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

ここで離散時刻は、電力ルータの制御タイミングを表し、 T は最適化期間に相当する。次節の計算機実験では深夜 0 時から翌日 7 時前までの期間を対象に 30 分毎に制御するため、 $T = 62$ となる。また、実験結果を踏まえて $N = 20$ とした。

各家庭の発電、消費量は、以下を既知として与える：

- 時刻 t における家庭 H_i の発電電力量 s_{it}^P
- 時刻 t における家庭 H_i の消費電力量 d_{it}

次節の計算機実験では、電力モニタリング実験 [3] で得られた 117 軒の一般家庭における 1 年間の実測値 (30 分ごとの積算電力量) を用いた。

最適化における決定変数は以下の 3 種である：

- t における H_i の系統電力からの買電量 s_{it}^G
- t における H_i の蓄電池への蓄電量 X_{it}^I
- t における H_i から H_j への融通電力量 y_{ijt}

これらの決定に伴い、以下の従属変数が決まる。

- t における H_i の蓄電量 X_{it}
- t における H_i の無駄電力量 v_{it}
- t における H_i の蓄電池からの放電量 X_{it}^O
- t における H_i から他の家庭への供給電力量 y_{it}^F
- t における他の家庭から H_i への供給電力量 y_{it}^T
- t における他の家庭から H_i への (送電・変電ロス を減じた) 供給電力量 y_{it}^{TA}

2.3 目的関数

2.3.1 買電量最小化モデル

minimize

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \{s_{it}^G + (y_{it}^T - y_{it}^{TA}) + (1 - \alpha^{XT})X_{it}\}$$

[1] で用いた目的関数であり、電力量の最小化を目指す。第1項はネットワーク全体の買電量、第2項は家庭間の電力融通によってロスする電力量、第3項は時間の経過に伴い蓄電池からロスする電力量を表す (α^{XT} は時間経過に伴う自己放電による電力ロスを引いた残存率。計算機実験では0.99とした)。第2項、3項は解を一意に定めるために加えている。

2.3.2 電気料金最小化モデル

まず、コスト係数を以下に定める：

- 系統電力コスト係数 c_t^P
- 変電・送電ロスコスト係数 c^L
- 自然放電コスト係数 c^N

c^P は t 依存とし、時間帯ごとに異なる系統電力単価を考える。そのもとで、以下のコスト最小化を目指す：

minimize

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \{c_t^P s_{it}^G + c^L (y_{it}^T - y_{it}^{TA}) + c^N (1 - \alpha^{XT})X_{it}\}$$

今回新たに考える目的関数であり、買電量ではなく料金を最小化する。第1項は系統に支払う電気料金であり、第2, 3項はここでも解を一意に定めるために加えた電力ロスに相当し、コスト係数で料金に換算する。次節では、電気料金を7時から23時までは1[kWh]当り36.14[円]、深夜23時から7時までは同じく13.1[円]に設定した。また c^L, c^N は同じく10[円]とした。

2.4 評価指標

利用効率の評価指標には以下の3つを用いる：

- 電気料金：系統からの総買電量 S に対する電気料金
- 系統独立度 $\rho = 1 - \frac{S}{D}$ ：ネットワーク内の総消費電力量 D のうち、系統電力から購入せずに、太陽光発電で賄う割合。
- 融通活発度 $\eta = \frac{Y}{D}$ ：ネットワーク内の総消費電力量のうち、融通 Y によって賄う割合。

3 計算機実験

数値計画ソルバ IROG CPLEX12 を利用して求めた最適解を用いて、各種条件下での効率や利用計画を比較する。消費と発電データには [3] の実測値を用いた。

3.1 太陽光発電量の違いによる効率の比較

太陽光発電は天候に大きく依存することから、最適化対象期間における発電量の違いを考える。そのために、快晴と曇りの日の発電データ、および雨天に相当する発電量ゼロの3つの場合を比較する。消費データは共通とし、全家庭が容量8[kWh]の蓄電池を持つとした。

Table1 に買電量最小化モデル、Table2 に電気料金最小化モデルの結果をそれぞれ示す。

Table 1: Results for minimization of power purchase

天候	電気料金	系統独立度 ρ	融通活発度 η
快晴	3012	0.558	0.085
曇り	6882	0.313	0.028
雨	12215	0	0

Table 2: Results for minimization of electricity bill

天候	電気料金	系統独立度 ρ	融通活発度 η
快晴	2873	0.555	0.094
曇り	6010	0.164	0.048
雨	10265	-0.199	0.009

表より以下のことが分かる。

1. 電気料金の比較：当然、両モデルで異なり、料金最小化モデルでは夜間に安価な電力を買い貯め、電気料金を抑えるのに対して、買電量最小化モデルでは蓄電池の自然放電を避け、買い貯めはせず、使用可能な電力量を増やす行動を取る。発電量が多い日は買い貯めをせずとも発電量でほとんど賄えるため、2つのモデルで電気料金に差が出ない。
2. 系統独立度 ρ の比較：料金最小化モデルでは買い貯めにより、系統からの買電量が増え、系統独立度が下がる。発電量ゼロのとき負となるのは、消費量 D を上回る買電量 S を表し、蓄電に伴う自然放電の結果である。
3. 融通活発度 η の比較：料金最小化モデルの方が融通が活発である。これは、買い貯めを行い消費にまわすことで、発電量のうち融通できる割合が増える。また、蓄電池残量がなくなる時間が延びることで融通の機会が増えるためである。

3.2 消費電力量の分散の違いによる効率の比較

家庭ごとの消費量の差が大きいほど家庭間の融通が有効に働くと思われるため、消費量分布の異なる家庭群で比較する。

消費量分布の指標として、 N 軒の消費量の標準偏差 σ^M を用いた。実験では、全消費データから等確率で20軒分のデータを選択して家庭群とし、 $\sigma^M = 5000, 6000, \dots, 9000$ を満たす5群ずつに対して各最適解を求め、それらの各評価指標の平均値を求めた。また前節の結果から、発電データは曇りの日から選んだ。さらに各家庭の蓄電池容量は一律とし、2, 4, 6, 8[kWh]と変えて比較した。

家庭ごとの消費量の偏差 σ^M に応じた3つの評価指標を以下の図に示す。Figs. 1-3 は買電量最小化、また Figs. 4-6 は電気料金最小化の各結果である。

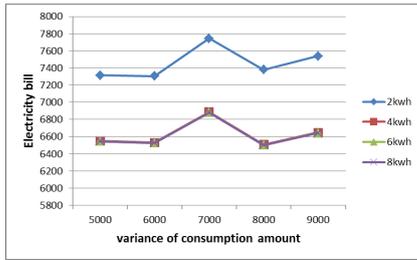


Figure 1: Relation between σ^M and electricity bill (by minimization of purchase amount)

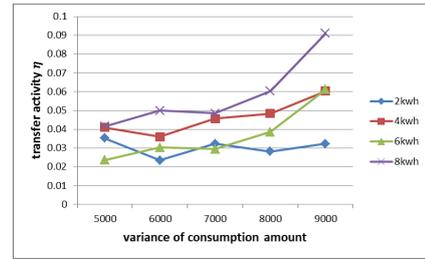


Figure 6: Relation between σ^M and transfer activity η

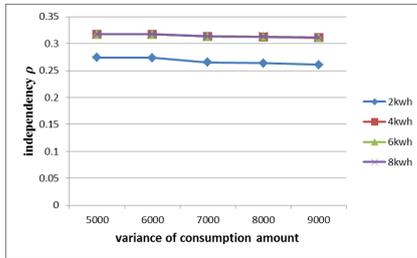


Figure 2: Relation between σ^M and in-dependency ρ

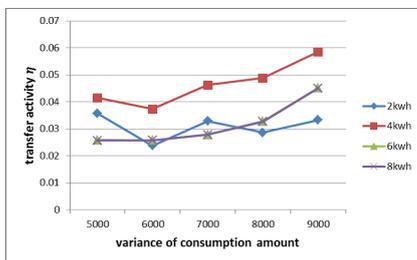


Figure 3: Relation between σ^M and transfer activity η

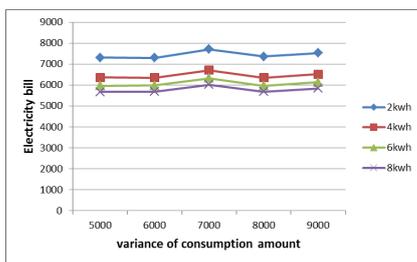


Figure 4: Relation between σ^M and electricity bill (by minimization of electricity bill)

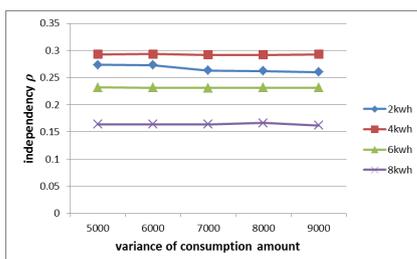


Figure 5: Relation between σ^M and in-dependency ρ

図より以下のことが分かる。

1. 電気料金：両モデルとも σ^M には余り影響されない。買電量最小化では、蓄電池容量が増加すると電気料金は減少するが、4[kWh]で飽和している。電気料金最小化モデルでは、蓄電池容量の増加とともに夜間電力をより多く買い貯め可能となり、電気料金が下がる。
2. 系統独立度 ρ ：両モデルとも σ^M に依らずほぼ一定である。買電量最小化モデルで、蓄電池容量が増加すると系統独立度は上昇するが、4[kWh]で飽和する。電気料金最小化モデルでは、蓄電池容量の増加により多く買い貯め、系統独立度が下がる。
3. 融通活発度 η ：両モデルとも蓄電池容量 4[kWh] 以上の場合、 σ^M が大きくなると融通活発度 η も大きくなっている。

以上より、消費量分布の影響は両モデルで共通であった。

4 おわりに

発電と蓄電機能をもつ一般家庭が、互いに電力を融通するネットワークに対して、1日の発電、消費電力量が既知の下での、電力の最適融通計画を求めた。本報告では特に、時間帯で変わる電力料金も考慮し、買電量最小化および電気料金最小化に対応する最適利用計画を比較した。今後は、発電、消費電力量が既知でない確率的最適化も検討したい。

References

- [1] M. Suzuki, K. Sakakibara and I. Nishikawa: Efficiency and Sensitivity Analysis of Distributed Power Network based on an Optimization Model: 2nd Korea-Japan Joint Workshop on Complex Communication Sciences(KJCCS'13) (2013).
- [2] 鈴木将義, 榊原一紀, 瀬尾昌孝, 西川郁子: 電力売買エージェント群による取引市場と電力ネットワークにおける最適融通, システム制御情報学会論文誌, Vol. 29, No. 2, pp.86-92 (2016).
- [3] 東近江市企画部緑の分権改革課 ひがしおうみコミュニティビジネス推進協議会: 平成 21 年度「東近江緑の分権改革推進事業」業務報告書 (太陽光発電モニタリングプロジェクト編), (2011).