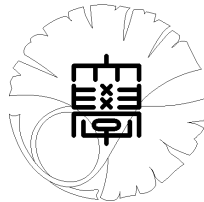


数理科学実践研究レター 2019–10 November 28, 2019

連続充電が義務付けられた電気自動車が存在する
電力システムでの電力価格の決定方法について

by

長岡 大



UNIVERSITY OF TOKYO
GRADUATE SCHOOL OF MATHEMATICAL SCIENCES
KOMABA, TOKYO, JAPAN

連続充電が義務付けられた電気自動車が存在する 電力システムでの電力価格の決定方法について

長岡大¹ (東京大学大学院数理科学研究科)

Masaru Nagaoka (Graduate School of Mathematical Sciences, The University of Tokyo)

概要

電力システムを安定させる手段の一つとして、適切に価格を設定することで、電気自動車の充電から生じる電力需要の時間帯をずらすことが考えられている。本稿では、電気自動車の充電開始からバッテリーが一杯になるまで充電を続けなければならないこと（以下、連続充電という）を義務付けた条件下において、適切な電力価格の決定方法を提案する。

1 はじめに

電力システムとは、電力の生産、供給及び消費からなる体系のことである。電力システム上では、停電等の人災を防ぐために供給電力は消費電力以上になる必要がある。また、電力の過剰供給による金銭的損失を避けるために、供給電力と消費電力の差は少ないほうが望ましい。以上より、従来の電力システムでは、消費電力に合わせて、供給電力を調節する必要があった。ここで、電気自動車にはバッテリー内に電力を貯蔵する時間帯と実際に運転をする時間帯が異なるという性質がある。そのため、電力システムに電気自動車が増えると、電気自動車の充電時間を適切に操作することで、供給電力に合わせて、消費電力を調節することが可能である。本稿では、電力価格を変化させることで、電気自動車の充電時間の操作を試みる。ここで問題となるのは、充電方法に制約をつけなければ、電力価格が安い時間帯にのみ電気自動車の充電から生じる電力需要が集まることである。そのため、本稿では電気自動車の充電開始からバッテリーが一杯になるまで充電を続けなければならないこと（以下、連続充電という）を制約として加え、適切な電力価格の決定方法を調べる。

謝辞 本研究にあたり、多大なる助言や励ましの言葉を下さった、日産自動車の池添圭吾さま、村井謙介さま、今別府悟さま、東京大学の金井雅彦先生、間瀬崇史先生、佐藤玄基さん、呉孟超さん、千葉悠喜さん、森脇湧登さんに深くお礼申し上げます。本研究は数物フロンティア・リーディング大学院(FMSP)の援助を受けたものです。

2 モデル

以下では、電気自動車の保有者を「顧客」、価格を決定する人を「電力事業者」と呼ぶ。小節 2.1 で顧客の電力需要の決定モデルを定義する。小節 2.2 で電力事業者の目標を設定する。また、その目標に沿った戦略を説明し、電力価格の決定モデルを提案する。

2.1 顧客モデル

本稿のモデルの設定期間を $T \subset \mathbb{R}$ 、顧客全体の集合を I とする。電気自動車以外の総消費電力を $D_{nonev}: T \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ 、電力価格を $V: T \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ とする。電気自動車の充電速度は一定の S とする。また、顧客 i の電気自動車の空き容量を B_i とする。顧客 i は以下のようにして、電気自動車の充電期間を定める：

- 1) 電力事業者により、電力価格 V が提示される。
- 2) 顧客 i は電力価格 V の下で、支払いが最小になるよう長さ B_i/S の連結な期間 $T_i \subset T$ を決定し、期間 T_i において充電速度 S で B_i だけ充電を行う。(=連続充電の制約)

以上の行動原理で決定した電気自動車の総消費電力を $D_{ev} = D_{ev}(V): T \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ とし、また総消費電力を $D = D(V) = D_{nonev} + D_{ev}$ とする。また、 $T' = \bigcup_{i \in I} T_i$ とおく。

¹nagaoka@ms.u-tokyo.ac.jp

2.2 電力事業者の目標, 戦略, 及び提案する価格決定モデル

電力事業者の目標は, n , R , D_{nonev} 及び $\{B_i\}_{i \in I}$ の分布が既知である仮定のもと, 総消費電力 D の変動がより小さくなる価格 V を提示することとする. 一つの戦略は, $V = cD_{nonev}$ ($c > 0$) と定めることである. すると, D_{nonev} が最小値をとる時刻を t_{min} としたとき D_{ev} は時刻 t_{min} で最大値をとるため, 電力需要が少ない時間帯に電気自動車の充電時間帯を合わせることが出来る. 一方で, 充電時間帯が t_{min} 付近に集中しすぎると, D が t_{min} 付近において最大値を取ってしまい, 結果として D の変動が大きくなる可能性がある. ここで連続充電の制約から生ずる, 2つの推測を紹介する:

- 空き容量 B_i が少ない場合, 充電期間 T_i が短い為, T_i は V が最小値をとる時刻と重なる.
- 空き容量 B_i が多い場合, 充電期間 T_i が長い為, T_i は V の平均が最小値をとる時間帯と重なる.

以上の推測から, V が最小値を取る時刻の前後では V が高い値を取るように設定することで, 空き容量が少ない顧客と多い顧客の充電期間を分散させることが出来るという着想を得た. この着想をもとに, 電力価格 $V_0 = D_{nonev}$, V_1, V_2, \dots を定める:

- 1) $V = V_0$ とし, $N = 1$ とする.
- 2) V に対して顧客の行動原理から D を計算する.
- 3) D が最小値を取る時刻を t_{min} とする.
- 4) t_{min} の近傍 2つ $t_{min} \in U_1 \subset U_2 \subset T$ を適当にとり, V の値を U_1 では $N/(N+1)$ 倍, $U_2 \setminus U_1$ では $(N+1)/N$ 倍したものを V_N と定める.
- 5) $V = V_N$ とし, N を 1 増やして, 2)-5) を繰り返す.

3 シミュレーション

価格決定モデルから得られる V_0 と V_l ($l > 0$) を比較するため, T を 18 時から 30 時 (=翌日の午前 6 時) までの 12 時間として, 価格決定のシミュレーションを行った. 時間の刻み幅は $1/6$ 時間とし, 各区間を $[t - 1/12, t + 1/12]$ とする. 顧客の数は 1000 人とし, 電気自動車の普及率を $R \in [0, 1]$ とする. 電気自動車以外の総消費電力 D_{nonev} は, 図 1 に総人口の数, すなわち $1000/R$ をかけたものとする. 充電速度 S は 3 kW とする. 残り容量 B_i は [1] に基づき, 最頻値が 2.6kWh となる Rayleigh 分布に従うよう乱数を取った. 価格決定モデルで計算する t_{min} に対し, $U_1 = [t_{min} - 3/12, t_{min} + 3/12]$, $U_2 = [t_{min} - 5/12, t_{min} + 5/12]$ と定め, 電力事業者は価格決定モデルに基づき V_{10} を決定した.

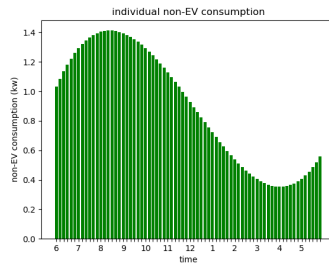


図 1: 電気自動車以外での一人当たりの消費電力

図 2 は普及率 $R = 0.2$ で $V = V_0$ での価格グラフ (左下) と D_{nonev} 及び D のグラフ (左上), そして $V = V_{10}$ での価格グラフ (右下) と D_{nonev} 及び D のグラフ (右上) を並べたものである. $V = V_0$ でのシミュレーションでは, 元々電気自動車以外の消費電力量が少なかった午前 3 時半前後に, 電気自動

車の電力需要が集中し、新たな電力消費量のピークを生み出してしまっている。一方、 $V = V_{10}$ のシミュレーションでは、電気自動車により生まれる電力消費量のピークが比較的小さいことがわかる。



(a) $V = V_0$ の場合

(b) $V = V_{10}$ の場合

図 2: $R = 0.2$ における各モデルの消費電力量と価格

表 1 は R の値に応じて各 100 回シミュレーションを行い、次の (A), (B) をそれぞれ満たした回数をまとめたものである:

$$(A) \max_{t \in T'} D(V_0)(t) \geq \max_{t \in T'} D(V_{10})(t).$$

$$(B) \min_{t \in T} D(V_0)(t) \leq \min_{t \in T} D(V_{10})(t).$$

(A) は電気自動車の充電時間帯での電力消費の最大値を、(B) は設定時間全体での電力消費の最小値を比べている。どちらも、 V_0 に比べて V_{10} の場合のほうが消費電力量の変動が少ない事を表している。

$R =$	0.2	0.1	0.05	0.04	0.03	0.01
(A)	100	99	100	59	0	3
(B)	99	98	99	74	19	0

表 1: シミュレーション 100 回中の (A), (B) の達成回数

$R \geq 0.05$ の場合は、(A), (B) どちらの達成回数も非常に多い。一方、 $R = 0.04$ の場合からどちらの達成回数も減り始め、 $R \leq 0.03$ の場合はほぼ達成されることは無くなってしまった。これは価格決定モデルの変数に R を入れる事で改善できる可能性があるため、それについて検討する必要がある。

4 結論

電気自動車の普及率が十分高い場合、元々の価格設定が自動車以外の総消費電力と相似なものであれば、今回の価格決定モデルを用いて、より総消費電力の変動が小さい価格設定を構成できることが分かった。しかし、電気自動車の普及率が低い場合には逆に総消費電力の変動を大きくしてしまったため、より良い価格決定方法を検討する必要がある。また、元々の価格設定が一般の場合でも適用できるモデルを構成する必要がある。

参考文献

- [1] 池上 貴志, 矢野 仁之, 工藤 耕治, 萩本 和彦, 負荷平準化による発電燃料費低減を目的とした電気自動車の多数台充電制御効果の評価, 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌), **133**, No. 6, 562–574 (2013)