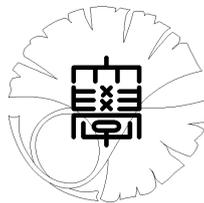


数理科学実践研究レター 2019–12 November 28, 2019

市場原理下での EV 充電最適化

by

呉 孟超



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

市場原理下での EV 充電最適化

呉 孟超¹ (東京大学大学院理学系研究科)

Mocho Go (Graduate School of Science, The University of Tokyo)

概要

今後 EV 市場は急速に拡大することが見込まれており, EV 充電に伴う電力需要の規模は全体の十数 % にも及ぶと予測されている. 巨大な EV 充電市場は社会による管理がなければ電力供給を不安定にする危険性を持つため, 何らかの方法で EV 充電を制御する必要がある. 本研究の目的は, EV ユーザーの不利益にならないように市場原理のもとで制御戦略を最適化することによって社会的に合理的なシステムを構築することである.

1 問題設定

1.1 概要

1 つの電力供給者と複数の電力需要が存在するコミュニティにおいて, 1 日の電力供給シナリオを考えたい. 電力需要は 2 パターンを考える. すなわち, EV (電気自動車) の充電需要と, その他の家庭電力需要である. さらに, 簡単のため EV は全て通勤に用いられるものとし, [1] を参考に生成した 100 台のデータから, i ($= 1, 2, \dots, 100$) 番目の EV について

- 帰宅時刻 S_i [h],
- 出発時刻 T_i [h],
- 必要電力量 E_i [kWh]

を取得し, (全ての i について E_i を一斉に定数倍する自由度を除いて) 固定する. その他の家庭電力需要も, [2] の 2017 年のデータから適当に選んだある正午から次の日の正午までの 24 時間分のデータを固定し, 時刻 t でのその他の電力需要の総和 $f(t)$ [kW] を固定して考える. ただし時刻が t であるとは, データの開始時刻の正午から t だけ経過した時刻であることを意味する. 後の都合のために, S_i, T_i はすべて $\frac{1}{60}$ [h] の整数倍であると仮定する.

各々の EV は S_i から T_i の間に E_i だけ充電しなければならない. すなわち, i 番目の EV の時刻 t での充電速度を $e_i(t)$ [kW] とおくと,

$$\int_{S_i}^{T_i} e_i(t) dt = E_i \quad (1)$$

でなければならない. EV には最大充電速度 V [kW] が存在するので,

$$0 \leq e_i(t) \leq V \quad (2)$$

でなければならない. 本来は $e_i(t)$ として任意の関数を考えることは現実的ではなく, オンかオフかの 2 状態 $e_i(t) = 0, V$ でなければならない, その切り替えも適当な時間間隔をおく必要があるが, 簡単のため任意の関数を許す. EV ユーザーは, (1) と (2) を満たす $e_i(t)$ であって, できる限り支払価格が少なくなるような充電計画 $e_i(t)$ を決めたい, とする. 時刻 t での電力価格を $\mathcal{P}(t)$ [円/kWh] とすると, i 番目の EV の支払価格は

$$M_i = \int_{S_i}^{T_i} \mathcal{P}(t) e_i(t) dt \quad (3)$$

とかける. EV ユーザーは各時刻 t における充電速度 $e_i(t)$ を決めるが, そのときに用いることのできる情報は, 時刻 $t = t_0$, 現在の電力価格 $p = \mathcal{P}(t_0)$, 残りの必要電力量 $m = E_i - \int_{S_i}^{t_0} e_i(t) dt$ のみであると仮定する. すなわち, EV ユーザーの戦略は関数

$$\alpha_i: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow [0, 1] \quad (4)$$

¹go@hep-th.phys.s.u-tokyo.ac.jp

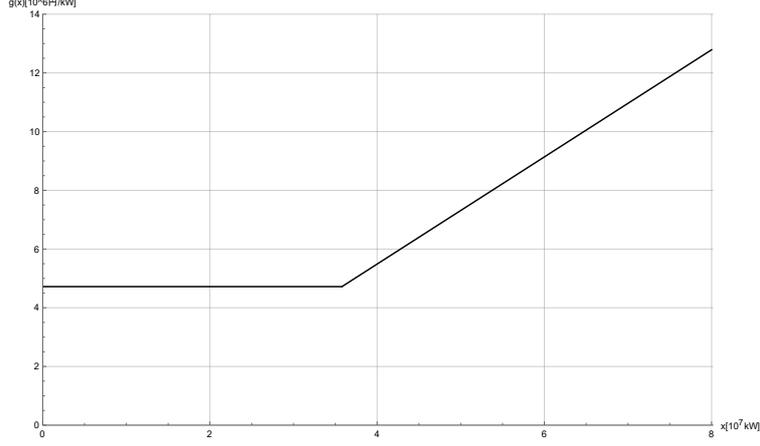


図 1: 供給曲線 (横軸は供給量, 縦軸は価格).

で書かれるものとし,

$$e_i(t) = V\alpha_i \left(t, \mathcal{P}(t), E_i - \int_{S_i}^t e_i(t') dt' \right) \quad (5)$$

と決めることにする. 以上より, EV ユーザーの行動は α_i, \mathcal{P} によって完全に記述される. 次に, 電力供給者の行動を定義する. 供給曲線を次のように定義する (図 1):

$$g(x) = 4.720 \times 10^6 + 1.825 \times 10^6 \max(0, x - 3.579 \times 10^7). \quad (6)$$

単位は $x[\text{kW}]$, $g(x)[\text{円/kWh}]$ である.

$$e(t) := \sum_i e_i(t) \quad (7)$$

とおくと, 時刻 t における実際の電力需要の総和は

$$\mathcal{E}(t) := e(t) + f(t) \quad (8)$$

なので, その瞬間の電力価格が $g(\mathcal{E}(t))$ [円/kWh] となるようにしたいが, そもそも日本の電力取引の仕組みでは 30 分ごとでしか電力価格が変動しない. そのため, $\Delta T = 0.5[\text{h}]$ として, 時刻 t ($t \in [n\Delta T, (n+1)\Delta T)$) における電力価格 $\mathcal{P}(t)$ は,

$$\mathcal{P}(t) = g \left(\max_{t' \in [n\Delta T, (n+1)\Delta T)} \mathcal{E}(t') \right) \quad (9)$$

となるように決めることにする. すなわち, 30 分ごとにそのあとの 30 分間の電力需要の最大値を求めて (現実的には予測して), 30 分間有効な電力価格を決める.

1.2 市場原理

ここで言う市場原理とは, ‘電力価格は供給曲線と需要曲線の釣り合いによって決まる’ という意味である. 供給曲線は図 1 である. 需要曲線の概略は次の通り: 時刻 t ($t \in [n\Delta T, (n+1)\Delta T)$) における電力価格を p に決めたとすると, それに従って $t \in [n\Delta T, (n+1)\Delta T)$ における EV の充電行動 $e_i(t)$, および総電力需要 $\mathcal{E}(t)$ が定まる. すなわち, $\mathcal{E}(t)$ は p の関数とすることができ, これを時刻 t での需要曲線と呼ぶ.

実際には 30 分単位で考えていることによる補正が必要である. あらためて書き直すと, $\tilde{e}_i(t, p)$ を $t \in [n\Delta T, (n+1)\Delta T)$ における積分方程式

$$\tilde{e}_i(t, p) = V\alpha_i \left(t, p, E_i - \int_{S_i}^t \tilde{e}_i(t', p) dt' \right) \quad (10)$$

の解であるとして,

$$\mathcal{M}_n(p) := \max_{t \in [n\Delta T, (n+1)\Delta T)} \left(\sum_i \tilde{e}_i(t, p) + f(t) \right) \quad (11)$$

と定義し, p の関数 \mathcal{M}_n を, 時刻 $n\Delta T$ における需要曲線と呼ぶ. そして市場原理は, $t \in [n\Delta T, (n+1)\Delta T)$ において

$$\mathcal{P}(t) = g(\mathcal{M}_n(\mathcal{P}(n\Delta T))) \quad (12)$$

が成り立つことを要請する.

1.3 離散化

以上の定式化を計算機によってシミュレーションするために, $e_i(t)$ を適当な階段関数で近似する. ここでは, ΔT をさらに 30 分割 $\Delta t = \Delta T/30$ し, $e_i(t) = e_i(\lfloor t/\Delta t \rfloor \Delta t)$ を要請する. そして, 積分方程式 (10) を

$$\tilde{e}_i(n\Delta t, p) = V\alpha_i \left(n\Delta t, p, E_i - \int_{S_i}^{n\Delta t} \tilde{e}_i(t', p) dt' \right) \quad (13)$$

で近似する ($t = n\Delta t$ でのみ成り立てばよいとする). ただし, この離散化によって $E_i = \int_{S_i}^{T_i} e_i(t) dt$ が満たされない可能性があるため, 次のように修正する. まず, ちょうど充電が終わるための $\tilde{e}_i(n\Delta t, p)$ の値の範囲を決定する. これは, $0 \leq \tilde{e}_i(n\Delta t, p) \leq V$ および

$$E_i \geq \int_{S_i}^{n\Delta t} \tilde{e}_i(t', p) dt' + \tilde{e}_i(n\Delta t, p) \Delta t \quad (14)$$

$$E_i \leq \int_{S_i}^{n\Delta t} \tilde{e}_i(t', p) dt' + \tilde{e}_i(n\Delta t, p) \Delta t + V(T_i - (n+1)\Delta t) \quad (15)$$

で決まり, これらによって $l \leq \tilde{e}_i(n\Delta t, p) \leq r$ の形の制約が得られる. このとき,

$$\tilde{e}_i(n\Delta t, p) = l + (r-l)\alpha_i \left(n\Delta t, p, E_i - \int_{S_i}^{n\Delta t} \tilde{e}_i(t', p) dt' \right) \quad (16)$$

とすれば必ず (誤差の範囲内で) $E_i = \int_{S_i}^{T_i} e_i(t) dt$ が満たされる (はじめに述べた仮定より, S_i, T_i は $\Delta t = \frac{1}{60}$ [h] の整数倍である).

次に, 価格を決定するために (12) を解く必要がある. 右辺の $g(\mathcal{M}_n(\mathcal{P}(t)))$ を $f: \mathcal{P}(t) \mapsto g(\mathcal{M}_n(\mathcal{P}(t)))$ という関数とみなすと (実際に価格を仮決めして ΔT だけシミュレートすればこの関数が得られる), これは固定点方程式 $x = f(x)$ である. 特に, 戦略 α_i が価格について単調減少 (電気代が高いほど充電を控える) であるとすれば, $f(x)$ も単調減少となる. よって, $f(x) \geq 0$ なので唯一の固定点が必ず存在する. 今回は二分探索と Newton 法を組み合わせることで近似的に解いた.

1.4 最適化

以上で, 戦略 α_i を固定したときのシミュレーションが可能となった. 次に, 全 EV の支払価格の総和 $\sum_i M_i$ が最小となるような α_i を探索することを考える. 任意の関数を探索することはできないので, ここでは, 6 個の実パラメータ a_1, \dots, a_6 で書かれる, i に依存しない一般的な戦略

$$\alpha_i(t, p, m) = \alpha(t, p, m) = S(a_1(p - a_2))^{a_3} \tilde{S}(-a_4(m - a_5) + a_6 t)^{1-a_3} \quad (17)$$

に限って探索する (m は残りの必要電力量 $E_i - \int_{S_i}^{t_0} e_i(t) dt$ に対応). $S(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$ はシグモイド関数, $\tilde{S}(x)$ は

$$\tilde{S}(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq 1) \\ 1 - \frac{1}{2}(1-x)^2 & (x \geq 0) \\ S(4x) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (18)$$

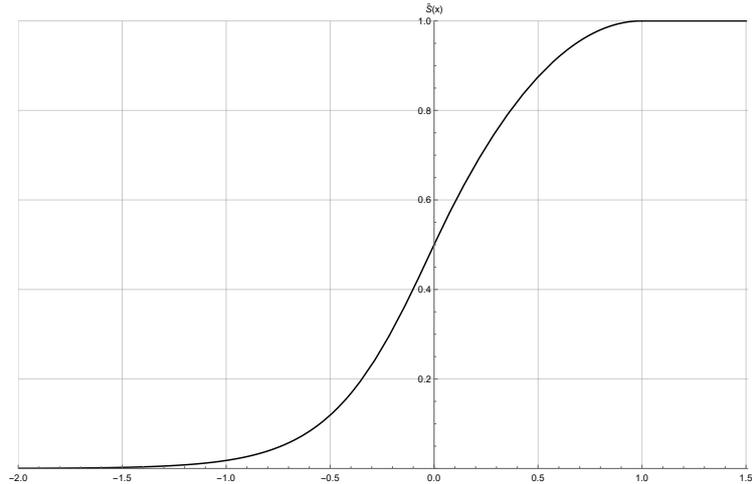


図 2: $\tilde{S}(x)$ の関数形.

である (図 2). (17) は, $S(\dots)$ が金額の寄与で, $\tilde{S}(\dots)$ が充電量の寄与で, 2 つの寄与の $a_3, 1 - a_3$ の重み付き相乗平均をとる.

有限個のパラメータの関数として $\sum_i M_i$ を書くことができたので, あとは最小化をすればよい. 数値的安定性を考慮して, 最小化には Nelder-Mead 法を用いた.

1.5 離脱係数

詳しくはシミュレーション結果でも述べるが, ここで ‘離脱係数’ を定義しておく. 戦略を固定するとシミュレーションによってその日の電力価格 $\mathcal{P}(t)$ が決定する. この $\mathcal{P}(t)$ を用いて, i 番目の EV ユーザーは $\int_{S_i}^{T_i} \mathcal{P}(t)e'_i(t)dt$ を最小にするような階段関数 $e': [S_i, T_i] \rightarrow [0, V]$ を求めることができる (価格の安い時刻から順番に最大速度で充電すればよい). そこで, 離脱係数 γ_i, Γ を

$$1 + \gamma_i := \frac{\int_{S_i}^{T_i} \mathcal{P}(t)e_i(t)dt}{\int_{S_i}^{T_i} \mathcal{P}(t)e'_i(t)dt} \quad (19)$$

$$\Gamma := \max_i \gamma_i \quad (20)$$

で定義する ($e_i(t)$ はシミュレーションで得られた解). $\gamma_i \geq 0$ である. γ_i が小さいほど, 戦略を変えてもそれ以上支払価格を安くすることはできないことを意味する.

2 シミュレーション結果

2.1 戦略を試す

比較のためにいくつかの単純な戦略を追加してシミュレーションを行い検討する.

- quick 戦略は $\alpha = \alpha_i = 1$ である. すなわち, 最も早く充電を終わらせる戦略である.
- slow 戦略は $\alpha_i = \frac{E_i}{V(T_i - S_i)}$ である. すなわち, 一定の充電速度で S_i から T_i まで充電し続ける戦略である.
- min_M 戦略は, (17) の形の α であって $\sum_i M_i$ を最小化する戦略である.
- min_M2 戦略は, (17) の形の α であって $(1 + 4\Gamma) \sum_i M_i$ を最小化する戦略である.

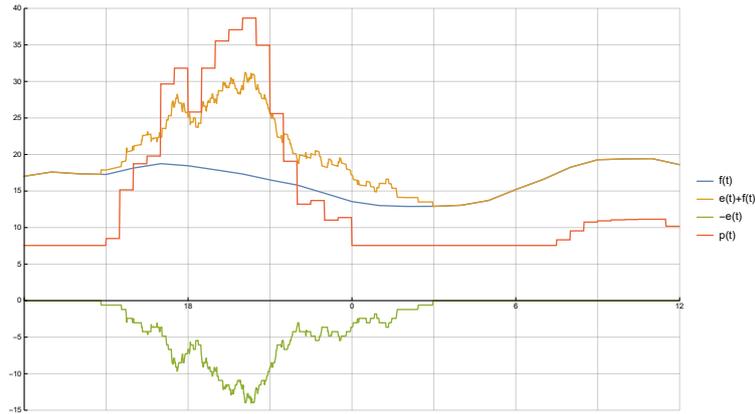


図 3: 戦略 quick の結果. 横軸は時刻 (正午から翌日の正午まで). 縦軸は本文中の説明の通り.

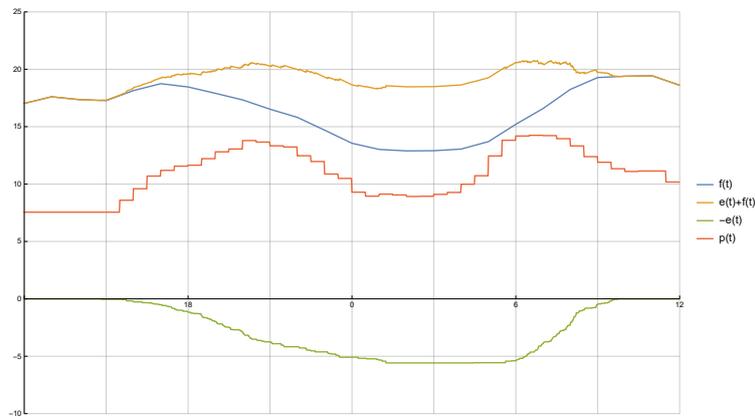


図 4: 戦略 slow の結果.

このうち, quick, slow 戦略は (17) の形では記述できない戦略である.

それぞれの戦略を用いてシミュレーションを行った結果が図 3-6 および表 1 である. 縦軸はリスケールしてあるため単位を書いていないが, $-e(t)$, $f(t)$, $e(t) + f(t)$ は同じスケール, $P(t)$ は異なるスケールを用いている (スケールの仕方はすべての図で統一してある). また, グラフを見やすくするために $e(t)$ ではなく $-e(t)$ をグラフに示している.

まず, 社会が EV 充電を一切管理しない場合, それぞれの EV ユーザーは quick を採用するであろう. しかし, 支払価格の観点からは quick は明らかに悪い. slow は支払価格が最小になっているため, 一見これを採用すべきように思えるが, γ_i が大きすぎるため, 実際には採用できない. なぜなら, $\gamma_i = 40.4[\%]$ の EV ユーザーは, ‘提示された戦略に従わずに自分で充電したほうが 40.4% も安くなる’ と考えうるからである. つまり, 離脱係数を小さく抑えておかないとシステムから離脱するユーザーが出てくることになる.

そこで, min_M を見てみると, 離脱係数の平均 $\langle \gamma_i \rangle$ は比較的小さいが, 最大値 Γ はそれほど小さくない. つまり, 一部の少数の EV ユーザーが損をしてしまっているので, 公平な戦略になっておらず, 好

戦略	$\sum_i M_i$	$\Gamma[\%]$	$\langle \gamma_i \rangle [\%]$
quick	20.94	399	252
slow	9.017	40.4	27.4
min_M	9.237	19.2	0.536
min_M2	9.329	2.07	0.0773

表 1: 各戦略の結果の summary

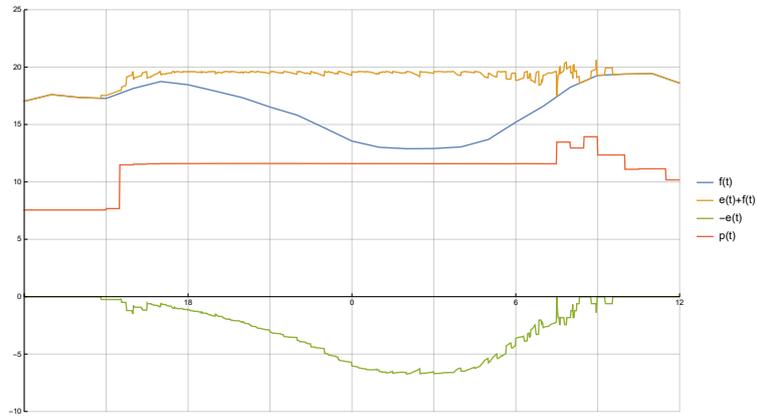


図 5: 戦略 \min_M の結果.

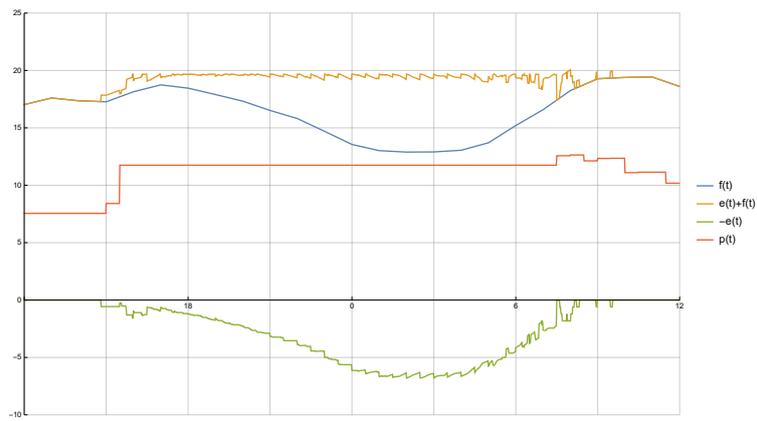


図 6: 戦略 \min_{M2} の結果.

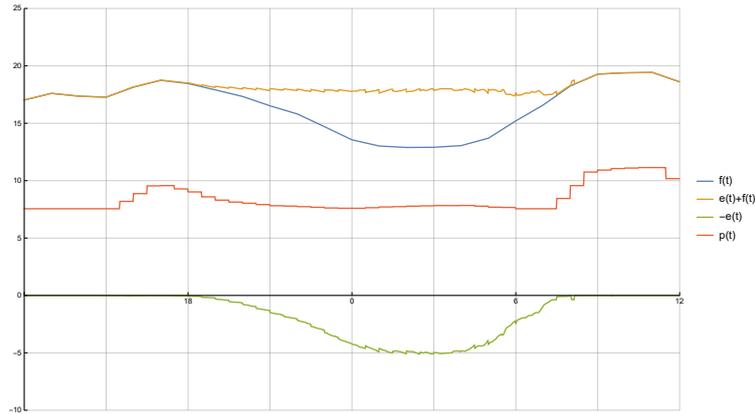


図 7: EV 比率が 9% の場合. $\Gamma = 3.61\%$.

ましくない。そこで、 M ではなく $(1+4\Gamma)M$ を最小化することで、 M と Γ を両方とも小さくすることを考える。戦略 \min_{M2} を見ると、 γ_i が一様に小さく抑えられていることがわかる。よって、 \min_{M2} が ‘EV ユーザーの支払価格を公平に安くする’ 戦略としてふさわしいと考えられる。また、総支払価格も slow より 3.46% 程度高くなってはいるが、これは ‘公平性を担保する上で必要なコスト’ と考えることができる。

さらに、 \min_M, \min_{M2} では価格がほとんど一定に保たれていることがわかる。これは slow にはない特徴である。すなわち、EV ユーザーの支払価格を最小化することは、電力需要が安定させる効果があることがわかった。

2.2 EV 比率依存性

図 3-6 では、総需要に占める EV 需要の割合が 14% の場合、すなわち

$$\int e(t)dt = \frac{14}{100} \int \mathcal{E}(t)dt \quad (21)$$

となるように E_i のスケールを調整してシミュレーションを行っていた。次に、 \min_{M2} を用いて EV 需要の割合を 9% から 17% まで 1% ずつ変化させてシミュレーションを行う。その結果が図 7-15 である。

これを見ると、14% の場合の

- Γ が小さい,
- $\mathcal{P}(t)$ が一定に保たれる

という性質が、15% 程度までであればいずれの場合にも認められることがわかる。

3 まとめ

本研究では EV 充電を含む電力市場を定式化し、市場原理のもとで EV ユーザーの支払価格および離脱係数を最小化することによって、EV 市場が一定の範囲内にあれば公平な EV 充電と安定した電力需要を同時に実現しうることが分かった。その際に用いたパラメータはわずか 6 個であるため、あらかじめ全 EV にその日の 6 個のパラメータを送信し、30 分に 1 回電力価格を送信するだけで、各 EV が自律的に EV 充電を行うシステムが構築可能である。

今後の研究では、実際の電力需要 $f(t)$ の予測が完全に的中するとは限らないため、最適解の安定性も調べる必要があるだろう。本研究の応用としては、例えば供給曲線に時刻依存性を持たせることで供給側の都合に合わせたより緻密な電力市場制御や、複数エージェントの存在する社会におけるゲーム理論の立場からの分析などが考えられる。

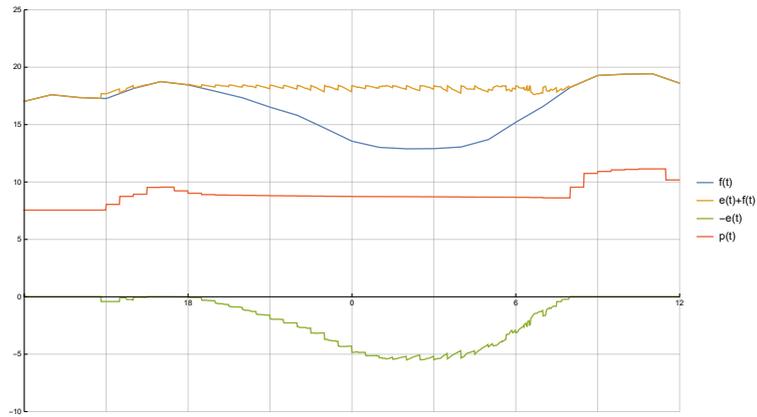


図 8: EV 比率が 10% の場合. $\Gamma = 2.36\%$.

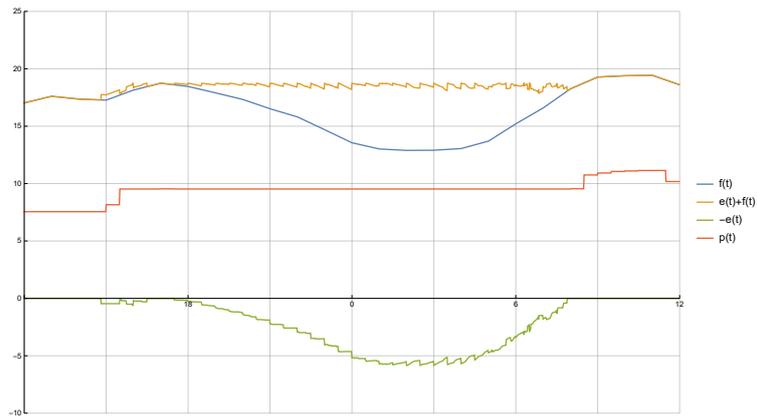


図 9: EV 比率が 11% の場合. $\Gamma = 7.83 \times 10^{-5}\%$.

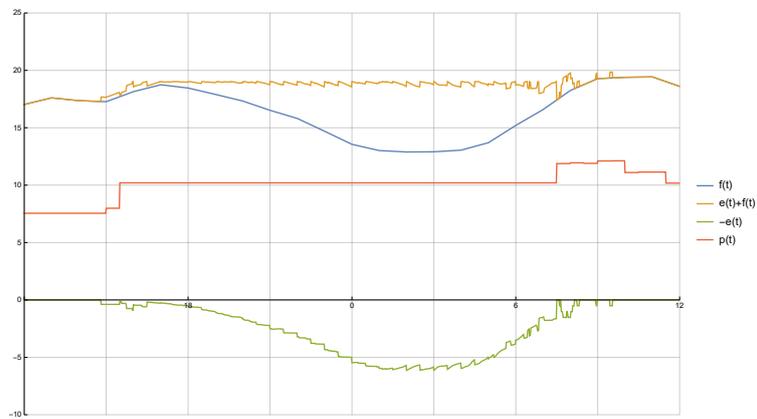


図 10: EV 比率が 12% の場合. $\Gamma = 4.69\%$.

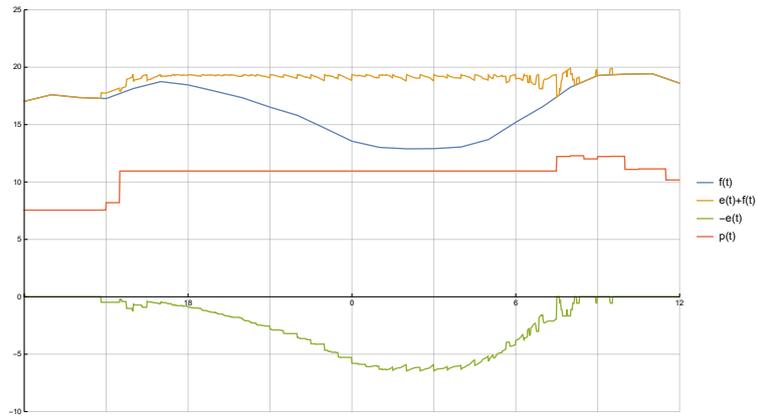


図 11: EV 比率が 13% の場合. $\Gamma = 3.36\%$.

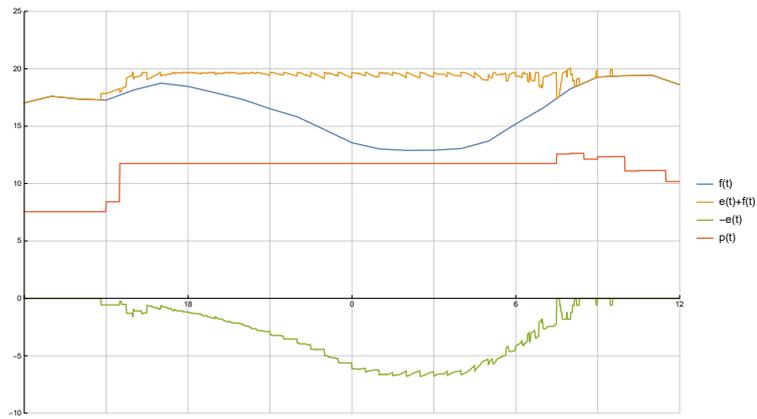


図 12: EV 比率が 14% の場合. $\Gamma = 2.07\%$.

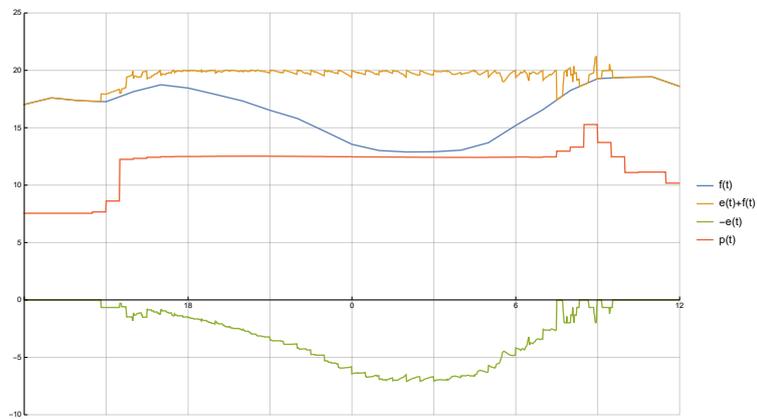


図 13: EV 比率が 15% の場合. $\Gamma = 4.76\%$.

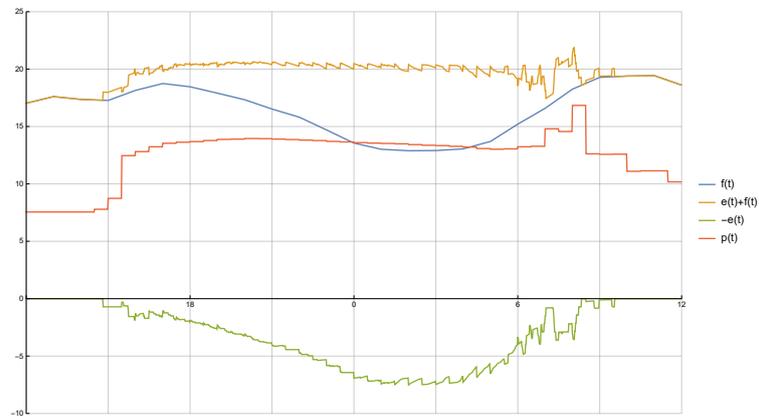


図 14: EV 比率が 16% の場合. $\Gamma = 8.06\%$.

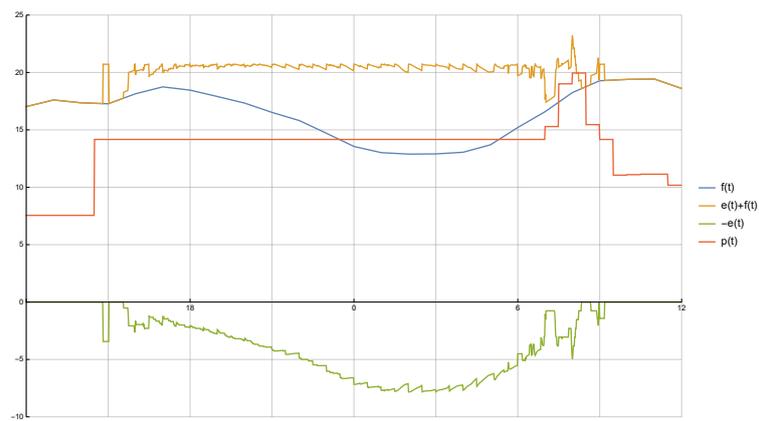


図 15: EV 比率が 17% の場合. $\Gamma = 14.0\%$.

謝辞

本研究は数物フロンティア・リーディング大学院 (FMSP) の助成を受けたものです。また、本研究を進めるうえで度々助言や議論をしてくださった、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、長岡大さん、千葉悠喜さん、森脇湧登さんに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 池上 貴志, 矢野 仁之, 工藤 耕治, 荻本 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, Vol.133, No.6, pp5620574 (2013).
- [2] でんき予報 (<http://www.tepco.co.jp/forecast/>).