

電力価格のリアルタイム・プライシングを考慮した スマートハウスの運用最適化

M2012MM050 保田将弘

指導教員：佐々木美裕

1 はじめに

近年、エネルギーを地域内で効率的に運用するスマートコミュニティが注目され、全国で実証実験が盛んに行われている。スマートコミュニティとは、地域内の風力発電、太陽光発電などの再生可能エネルギーをIT技術を駆使して有効活用する社会システムのことである。スマートコミュニティの中心となるシステムはコミュニティ・エネルギー・マネジメント・システム (CEMS) である。CEMSはスマートコミュニティ内の電力の需給の調整や再生可能エネルギーによる発電量の予測など地域全体のエネルギー管理を行うシステムである。スマートコミュニティの実証実験のとしてリアルタイム・プライシングの試験導入も行われている。リアルタイム・プライシングは、CEMSの主要機能の1つであり、電力価格が需給状況の変化に応じて時間ごとに設定され、常に変動し続ける料金体系のことである。

本研究では需要家をスマートハウス居住者とし、リアルタイム・プライシングの導入が需要家に与える影響を分析する。スマートハウスにはホーム・エネルギー・マネジメント・システム (HEMS) が導入されており、このシステムによりCO₂排出量の削減やエネルギーコストの最小化を実現している。CEMSが電力価格を設定すると、HEMSはその情報を元に燃料電池、蓄電池、太陽電池を最適活用して電力・温水需要を満足するように運転費用を最小化する。HEMSによるスマートハウス運用最適化問題は、尾添ら [2] が家庭の電力需要量、熱需要量、太陽光発電量を確率変数と仮定し、2段階確率計画問題として定式化している。また、高須ら [3] は尾添らのモデル [2] で扱われたモデルの単位リコースあたりのコストが定数であることに注目し、スマートハウスは複数のエネルギー供給源を保有することから、リコースの供給源を不確定としたモデルを定式化した。しかし、この論文ではリアルタイム・プライシングを考慮した研究はされていない。本研究では家庭の電力需要量、熱需要量、太陽光発電量は定数で与えられるものと仮定し、リアルタイム・プライシングをの導入を考慮したスマートハウスの運用最適化問題のモデルを提案する。

2 スマートハウスの運用最適化モデル

2.1 モデルの概要

本モデルでは、各自のスマートハウスの電力需要量、熱需要量、および太陽光発電量は事前に確定的に予測できるものと仮定する。HEMSがCEMSから受け取る電力価格情報は、買電価格と売電価格の2種類ある。これらの電力価格は本モデルではあらかじめCEMSから与えられるため、定数として扱う。

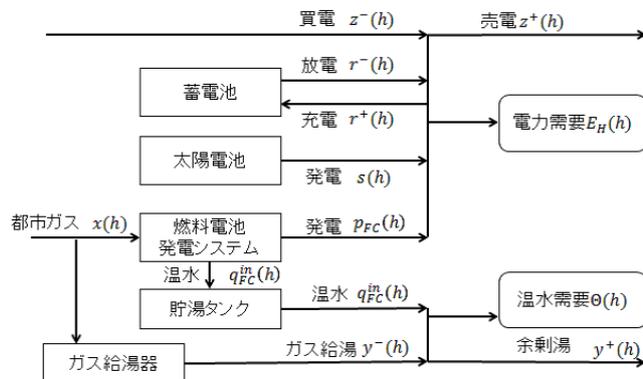


図1 HEMSのモデル

スマートハウスのエネルギーの流れを図1に示す。HEMSが制御している機器は蓄電池、太陽電池、燃料電池の3種類で構成されるものとする。蓄電池は電力を一時的に溜めておくことができる機器であり、充電や放電を繰り返して活用される。太陽電池は太陽光エネルギーから電力を生み出す機器であり、電力需要や充電、売電に充てられる。なお、売電可能な電力量は最大でその時刻の太陽光発電量までである。燃料電池はガスを燃料として発電を行う機器である。燃料電池は発電を行う際に、同時に熱も発生する。ここで発生する熱は蓄熱タンクに蓄えられ、必要に応じて温水需要に充てられる。また、燃料電池は起動時に本体を温めるための起動費用が必要であり、燃料電池の稼働中は、常に一定量の燃料を投入する必要がある。

対象の期間を H 時間とし、時刻の添字集合を $\mathcal{H} = \{1, 2, \dots, H + 1\}$ と表す。時刻 $H + 1$ は対象期間の終了時刻である。時刻 h の電力需要を表す定数を $E_H(h)$ 、温水需要を表す定数を $\Theta(h)$ 、太陽光発電量を表す定数を $s(h)$ 、時刻 h のガスの購入量を表す変数を $x(h)$ 、買電量を表す変数を $z^-(h)$ 、売電量を表す変数を $z^+(h)$ 、ガス給湯量を表す変数を $y^-(h)$ 、余剰湯量を表す変数を $y^+(h)$ 、蓄電池の充電量を表す変数を $r^+(h)$ 、蓄電池の放電量を表す変数を $r^-(h)$ 、燃料電池の発電量を表す変数を $p_{FC}(h)$ 、燃料電池の排熱回収量を表す変数を $q_{FC}^{in}(h)$ 、貯湯タンクからの出湯量を表す変数を $q_{FC}^{out}(h)$ とする。

2.2 目的関数

HEMSのモデルの目的は各エネルギー需要を満たし、スマートハウスの運転費用の総和を最小化することである。燃料電池は起動するたびに一定の費用がかかるため、

$$\alpha_{FC}(h) = \begin{cases} 1, & \text{時刻 } h \text{ に燃料電池が起動するとき} \\ 0, & \text{それ以外するとき} \end{cases} \quad (1)$$

となる 0-1 変数を導入し、目的関数は

$$\begin{aligned} & C_1 \sum_{h=1}^H x(h) + C_3 \sum_{h=1}^H \alpha_{FC}(h) \\ & + \sum_{h=1}^H C_5(h) z^-(h) - \sum_{h=1}^H C_6 z^+(h) \\ & + C_7 \sum_{h=1}^H y^-(h), \quad h \in \mathcal{H} \end{aligned} \quad (2)$$

と表すことができる。ただし、 C_1 , C_3 , $C_5(h)$, C_6 , C_7 はそれぞれ燃料電池のガス燃料の単価、燃料電池の 1 回あたりの起動費用、時刻 h の単位電力量の買電価格、単位電力量の売電価格、単位熱量あたりの給湯費用である。第 1 項は燃料電池のガス燃料の総費用、第 2 項は燃料電池の総起動費用、第 3 項は総買電費用、第 4 項は売電利益に -1 を掛けたもの、第 5 項は総給湯費用を表している。

2.3 制約条件

[蓄電と充放電に関する制約条件]

時刻 h の蓄電池の蓄電量を表す変数を $R(h)$ 、蓄電池に蓄電可能な電力量の最大値と最小値を R_{\max} , R_{\min} とする。また、蓄電池の初期蓄電量を表す定数を R_0 とする。ただし、 R_0 は $R_{\min} \leq R_0 \leq R_{\max}$ を満たさなければならない。すなわち、

$$R(1) = R_0 \quad (3)$$

であり、すべての期間において次の条件が成り立つ。

$$R_{\min} \leq R(h) \leq R_{\max}, \quad h \in \mathcal{H}. \quad (4)$$

また、時刻 h の蓄電池の充電量を表す変数を $r^+(h)$ 、放電量を表す変数を $r^-(h)$ とし、蓄電池の充電効率を η_B^C 、放電効率を η_B^D とすると、蓄電池の蓄電量に関する次の条件が成り立つ。

$$R(h+1) = R(h) + \eta_B^C r^+(h) - \frac{r^-(h)}{\eta_B^D}, \quad h \in \mathcal{H}. \quad (5)$$

$$r^+(h) \geq 0, \quad r^-(h) \geq 0, \quad h \in \mathcal{H}. \quad (6)$$

蓄電池は同時刻に充電と放電を行うことができない。ゆえに充電量 $r^+(h)$ と放電量 $r^-(h)$ のうち、少なくとも一方は 0 でなければならない。また、充電量 $r^+(h)$ と放電量 $r^-(h)$ は、最小値 r_{\min} から最大値 r_{\max} の範囲の値をとらなければならない。ここで、

$$\delta_R^+(h) = \begin{cases} 1, & \text{時刻 } h \text{ に蓄電池が充電するとき} \\ 0, & \text{それ以外するとき} \end{cases}$$

$$\delta_R^-(h) = \begin{cases} 1, & \text{時刻 } h \text{ に蓄電池が放電するとき} \\ 0, & \text{それ以外するとき} \end{cases}$$

となる変数を導入すると、蓄電池の充電と放電が同時に行われないことを表す制約は次のように書ける。

$$\delta_R^+(h) + \delta_R^-(h) \leq 1, \quad h \in \mathcal{H}. \quad (7)$$

充電量のとり得る値の範囲は補助変数 $\lambda_{R^+}^1(h)$, $\lambda_{R^+}^2(h)$ を導入し、次のように表す。

$$\lambda_{R^+}^1(h) + \lambda_{R^+}^2(h) = \delta_R^+(h), \quad h \in \mathcal{H}. \quad (8)$$

$$\lambda_{R^+}^1(h) \geq 0, \quad \lambda_{R^+}^2(h) \geq 0, \quad h \in \mathcal{H}. \quad (9)$$

$$r^+(h) = r_{\min} \lambda_{R^+}^1(h) + r_{\max} \lambda_{R^+}^2(h), \quad h \in \mathcal{H}. \quad (10)$$

放電量のとり得る値の範囲も同様にして補助変数 $\lambda_{R^-}^1(h)$, $\lambda_{R^-}^2(h)$ を導入し、次のように表す。

$$\lambda_{R^-}^1(h) + \lambda_{R^-}^2(h) = \delta_R^-(h), \quad h \in \mathcal{H}. \quad (11)$$

$$\lambda_{R^-}^1(h) \geq 0, \quad \lambda_{R^-}^2(h) \geq 0, \quad h \in \mathcal{H}. \quad (12)$$

$$r^-(h) = r_{\min} \lambda_{R^-}^1(h) + r_{\max} \lambda_{R^-}^2(h), \quad h \in \mathcal{H}. \quad (13)$$

[燃料電池の入出力に関する制約条件]

燃料電池の燃料投入量 $x(h)$ は停止中は 0、稼働中は x_{\min} から x_{\max} の範囲でなければならない。この条件を表すため、燃料電池の稼働状況を表す変数 $\delta_{FC}(h)$ を

$$\delta_{FC}(h) = \begin{cases} 1, & \text{時刻 } h \text{ に燃料電池が稼働している} \\ 0, & \text{時刻 } h \text{ に燃料電池が稼働していない} \end{cases}$$

と定義し、補助変数 $\lambda_{FC}^1(h)$, $\lambda_{FC}^2(h)$ を導入して次のように表す。

$$\lambda_{FC}^1(h) + \lambda_{FC}^2(h) = \delta_{FC}(h), \quad h \in \mathcal{H}. \quad (14)$$

$$\lambda_{FC}^1(h) \geq 0, \quad \lambda_{FC}^2(h) \geq 0, \quad h \in \mathcal{H}. \quad (15)$$

$$x(h) = x_{\min} \lambda_{FC}^1(h) + x_{\max} \lambda_{FC}^2(h), \quad h \in \mathcal{H}. \quad (16)$$

また、燃料電池の発電量 $p_{FC}(h)$ と発熱量 $q_{FC}^{in}(h)$ の関係は、

$$p_{FC}(h) = ax(h) + p_{FC0} \delta_{FC}(h), \quad h \in \mathcal{H} \quad (17)$$

$$q_{FC}^{in}(h) = bx(h) + q_{FC0}^{in} \delta_{FC}(h), \quad h \in \mathcal{H} \quad (18)$$

$$p_{FC}(h) \geq 0, \quad q_{FC}^{in}(h) \geq 0, \quad h \in \mathcal{H} \quad (19)$$

で表される。ただし、 a , p_{FC0} , b , q_{FC0} は定数である。また、燃料電池が起動する時刻のみ 1 となる変数 $\alpha_{FC}(h)$ に関して、次の式が成り立つ。

$$\delta_{FC}(1) = \delta_{FC0}. \quad (20)$$

$$\delta_{FC}(h) - \delta_{FC}(h-1) \leq \alpha_{FC}(h), \quad h \in \mathcal{H}. \quad (21)$$

$$\alpha_{FC}(h) \geq 0, \quad h \in \mathcal{H}. \quad (22)$$

ただし, δ_{FC0} は

$$\delta_{FC0} = \begin{cases} 1, & \text{燃料電池が時刻 1 から起動しているとき} \\ 0, & \text{それ以外するとき} \end{cases}$$

で定義される定数である.

[貯湯タンクに関する制約条件]

時刻 h の蓄熱タンクの蓄熱量を表す変数を $Q(h)$ とし, 蓄熱タンクに溜められる熱量の最大値と最小値を Q_{\max} , Q_{\min} とする. また, 蓄熱タンクの初期蓄熱量を Q_0 とすると, 次の式が成り立つ.

$$Q(1) = Q_0. \quad (23)$$

$$Q_{\min} \leq Q(h) \leq Q_{\max}, \quad h \in \mathcal{H}. \quad (24)$$

$$Q(h+1) = Q(h) + q_{FC}^{in}(h) - q_{FC}^{out}(h), \quad h \in \mathcal{H}. \quad (25)$$

[電力と熱の需給バランスに関する制約条件]

すべての時刻において, 電力の需給バランスが満たされなければならないので, 次の制約が成り立つ.

$$\begin{aligned} p_{FC}(h) + s(h) + z^-(h) + r^-(h) \\ = E_H(h) + z^+(h) + r^+(h), \quad h \in \mathcal{H}. \end{aligned} \quad (26)$$

$$z^+(h) \geq 0, \quad z^-(h) \geq 0, \quad h \in \mathcal{H}. \quad (27)$$

熱の需給バランスについても同様に, 次の制約が成り立つ.

$$q_{FC}^{out}(h) + y^-(h) = \Theta(h) + y^+(h), \quad h \in \mathcal{H}. \quad (28)$$

[買電と売電に関する制約条件]

買電と売電は同時にできないので, すべての時刻において, $z^-(h)$ と $z^+(h)$ の少なくとも一方は 0 でなければならない. M を十分大きな値とし, 変数 $\delta_{ESW}(h)$ を

$$\delta_{ESW}(h) = \begin{cases} 1, & \text{時刻 } h \text{ に買電しないとき} \\ 0, & \text{時刻 } h \text{ に売電しないとき} \end{cases}$$

と定義すると, この制約は次の式で表すことができる.

$$z^+(h) \leq M\delta_{ESW}(h), \quad h \in \mathcal{H}. \quad (29)$$

$$z^-(h) \leq M(1 - \delta_{ESW}(h)), \quad h \in \mathcal{H}. \quad (30)$$

また, 時刻 h に売電できる電力量は, その時刻に太陽光電池で発電した電力量を超えてはいけない. ゆえに,

$$z^+(h) \leq s(h), \quad h \in \mathcal{H} \quad (31)$$

が満たされなくてはならない.

2.4 電力価格シナリオの評価方法

電力価格シナリオの評価基準を考えるにあたり, 需要家の集合を $\mathcal{I} = \{1, 2, \dots, I\}$ とし, 需要家 i の時刻 h の買電量を $z^-(i, h)$, 売電量を $z^+(i, h)$ と表す. ここでは, 以下の 3 つの評価関数を用いて評価を行う.

- 評価関数 1: CEMS 運用者の利益最大化.

$$\begin{aligned} \text{maximize} \quad & \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^H C_5(h) z^-(i, h) \\ & - \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^H C_6(h) z^+(i, h), \end{aligned} \quad (32)$$

- 評価関数 2: 地域の電力消費量最小化.

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^H z^-(i, h) \\ & - \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^H z^+(i, h), \end{aligned} \quad (33)$$

- 評価関数 3: 電力の地産地消推進.

$$\text{minimize} \quad \sum_{h=1}^H \left| \sum_{i=1}^I \{z^-(i, h) - z^+(i, h)\} \right| \quad (34)$$

3 計算実験

前節で定式化したスマートハウス運用最適化モデルを用いて, 10 軒の需要家に対して計算を行った. 2008 年 10 月下旬から 11 月初旬に計測された電力需要, 温水需要, 太陽光発電量実データを使用し, 対象期間は午前 1 時からの 24 時間に設定した. 計算に使用したソフトウェアは, IBM ILOG CPLEX 12.5 であり, 計算機の性能は CPU が Intel(R) Core i7-3610QM, メモリが 8GB である. さまざまな状況を考慮し, 6 つの価格シナリオを作成したが, ここでは得られた結果の一部を紹介する.

使用する各定数の値を表 1 に示す. 初期時刻の蓄電池の蓄電量, 貯湯タンクの蓄熱量および燃料電池の稼働状況は対象期間の終了時刻一致するように定めた. このように設定することにより, 同じ需要パターンが毎日繰り返されることを仮定することができる. 各価格シナリオの買電価格を表 2 に示す. 「RTP 前」は, リアルタイム・プライシング導入前の価格である. 「RTP1」は価格帯を 3 種類で, 「RTP2」は価格帯を 2 種類で設定したものである. 「RTP3」は電力需要のピークシフトを考慮し, 昼間の電力価格を高く設定したものである. 「RTP6」は太陽光発電が可能な時間帯に電力価格が安くなる設定である. また, 売電価格は 0.031 円/Wh に設定した. 実行時間はどの需要家に対しても 1 秒未満であった.

各価格シナリオの評価値を表 3 に示す. 評価関数 1 や評価関数 2 では負の値を示した. これは買電量よりも売電量が多く, CEMS 運用者は赤字となることを表している. この原因は売電価格が買電価格よりも高く設定されていたことだと考えられる. 特に RTP 前では電力価格が安い時間帯が存在しないため, 買電量は少なく, 電力需要は主に燃料電池で賄っている. 評価関数 3 では, RTP6 以外の価格シナリオでは大きな値を示した. これは各需要家とも電力価格の安い深夜から未明までに買電する傾向だったことが原因である. 需要家の一例として, 図 2

表 1 定数の値

| 定数 | 値 | 定数 | 値 |
|----------------|----------------------|--------------|------------|
| C_1 | 0.008 | Q_0 | $Q(H + 1)$ |
| C_2 | 10.000 | η_B^C | 0.900 |
| C_7 | 0.009 | η_B^D | 0.900 |
| x_{\min} | 780.000 | R_{\min} | 0.000 |
| x_{\max} | 1990.000 | R_{\max} | 5000.000 |
| a | 0.615 | R_0 | $R(H + 1)$ |
| b | 0.380 | r_{\min}^- | 0.000 |
| q_{FC0}^{in} | -205.000 | r_{\max}^- | 1000.000 |
| p_{FC0} | -28.000 | r_{\min}^+ | 0.000 |
| Q_{\min} | 0.000 | r_{\max}^+ | 1000.000 |
| Q_{\max} | 10467.000 | M | 10000.000 |
| δ_{FC0} | $\delta_{FC}(H + 1)$ | | |

表 2 各価格シナリオの買電価格 [円/Wh]

| 時刻 | RTP 前 | RTP1 | RTP2 | RTP3 | RTP6 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1-7 | 0.0238 | 0.0120 | 0.0120 | 0.0137 | 0.0200 |
| 8-9 | | 0.0239 | 0.0282 | 0.0291 | 0.0238 |
| 10-13 | | 0.0341 | | 0.0150 | |
| 14-15 | | | | 0.0580 | |
| 16 | | | | 0.0350 | |
| 17 | | 0.0239 | 0.0291 | 0.0350 | |
| 18-23 | | 0.0239 | 0.0291 | 0.0350 | |
| 24 | | 0.0120 | 0.0120 | 0.0137 | 0.0200 |

に RTP 前と RTP3 のときの買電量, 売電量, ガス燃料投入量, ガス給湯量をまとめたものを示す。この需要家は, RTP 前では買電を行わず, 24 時間燃料電池を稼働させて電力需要を賄っている。しかし, RTP3 では燃料電池の稼働時間が短くなり, 電力価格の安い時間帯に買電を行って蓄電池に充電しておき, 昼間は蓄電池から電力を供給し, 売電は出来る限り行う結果となった。

得られた結果では売電価格が買電価格を上回っているため, どの価格シナリオでも売電率(太陽光発電量に対する売電量)が 95% 以上となる結果となった。そこで売電価格を 0.024 円, 0.022 円, 0.02 円に設定して最適化して売電率を求めた。RTP6 以外の価格シナリオでは, 売電率は 90% 以上を維持していたが, RTP6 では売電価格を 0.02 円に設定したときは売電率は約 50% となった。RTP6 では太陽光発電が可能である昼間の時間帯において買電価

表 3 価格シナリオと評価関数値

| シナリオ | 評価関数 1 | 評価関数 2 | 評価関数 3 |
|-------|---------|----------|----------|
| RTP 前 | -1954.5 | -57734.5 | 93317.8 |
| RTP1 | -1510.9 | -4406.0 | 149793.8 |
| RTP2 | -1503.3 | -4406.0 | 150642.9 |
| RTP3 | -1386.0 | -4851.3 | 150055.8 |
| RTP6 | -1645.0 | -38267.1 | 109080.3 |

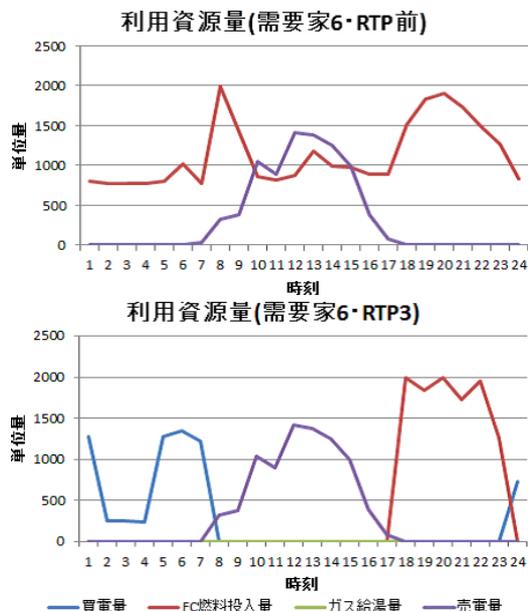


図 2 需要家 6 の時間帯別利用資源量

格が安い場合, 売電よりも買電が優先されやすいと考えられる。

4 まとめと今後の課題

HEMS のスマートハウス運転費用最小化問題を定式化し, さまざまな価格シナリオのもとで 10 軒の需要家が持つ HEMS の運用費用を最小化した。さらに最小化した結果から, 価格シナリオの評価を行った。

今後の課題は, CEMS の最適価格決定問題を解くことである。CEMS の問題は制約に HEMS の最適化問題を含む 2 段階最適化問題である。この問題を解くために, Heder らが考案した Direct Search Simulated Annealing[1] を利用することを検討している。

謝辞

本研究を進めるにあたり, 貴重なコメントを下された南山大学の福嶋雅夫先生, 大石泰章先生に感謝の意を表す。

参考文献

- [1] A.R. Hedar and M. Fukushima (2002): "Hybrid simulated annealing and direct search method for nonlinear unconstrained global optimization", *Optimization Methods and Software*, Vol. 17, pp. 891-912.
- [2] 尾添俊介, 田中洋一, 福嶋雅夫 (2011): 「リソース付き確率混合整数計画法によるスマートハウスの運用最適化」, 電気学会論文誌 B, Vol. 131, No. 11, pp. 885-895.
- [3] 高須啓介, 田中洋一, 福嶋雅夫 (2013): 「相補性制約をもつ非線形 2 次錐計画問題に対する平滑化法とスマートハウス運転計画問題への適用」, システム制御情報学会論文誌, Vol. 26, No. 1, pp. 34-44.