

ヒートポンプを核としたスマートコミュニティに関する研究
 (その9) モデル予測型 HEMS の適切な制御時間間隔に関する検討
 Study on smart community integrated with heat pump
 (Part 9) Simulation of appropriate control time interval of model predictive HEMS
 in Hokkaido

学生会員 ○山口 大 (北海道大学) 学生会員 藤井 健斗 (北海道大学)
 非会員 周 佳奕 (北海道大学) 非会員 曾 育民 (北海道大学)
 正会員 長野 克則 (北海道大学)

Hiroshi YAMAGUCHI*¹ Kento FUJII*¹ Jiayi ZHOU*¹ Zeng Yvmin*¹ Katsunori NAGANO*¹

*¹ Hokkaido University

The purpose of this study is to explain the calculation method of the self-contained control type HEMS that has been developed up to the previous report No.8. In addition, the control time step, which was set at one hour, has been changed to 10 minutes in order to improve the ability to load and solar radiation. A comparison of the one-hour control and the 10-minute control on the coldest day in 2019 showed a 17 % cost reduction effect. The relationship between running cost and photovoltaic power generation was confirmed by performing the annual simulation.

はじめに

本研究は、気象予測から自動的に電力・熱の双方の需給を制御する自律制御型 HEMS の構築のため、最適化計算方法の確立・実証実験設備とその制御システムの構築・その運転試験までを一括して行うものである。著者らは既報その8までにおいて HEMS プログラムを開発し、その有効性を検証した^{1),2)}。しかし、従来の方法では最適運転計画の時間刻みは1時間であるため負荷や日射量の外部条件が平均化されてしまい、実際の負荷に追従した最適運転計画に十分な時間刻みであるとは言えなかった。

そこで本報では最適運転計画の時間刻みを10分に細分化し、コスト削減効果を検証することを目的とする。

1. 研究手法

1.1 本研究で対象とするシステム

本研究の対象システムは、住宅内の蓄電池・給湯ヒートポンプ（以下、給湯HP）を想定した。図-1にシステムの系統図を示す。電力負荷は、北海道電力提供の札幌を想定したモデル住宅の実測値の主幹負荷を用いた。給湯負荷はM1スタンダードモデルに基づき作成したものを使用した。また、表-1にシステムの設備仕様をまとめる。時間別電力価格は北海道電力の時間別電力料金プランである eTime3 を参考に作成した。時間別電力買取価格については、昨今の再生可能エネルギー設備の増加に

伴う PV の発電量を制限する出力制御などを考慮して昼間の時間帯（9:00~15:00）の電力買取価格を極端に下げた値 0.1 円/kWh を設定した。

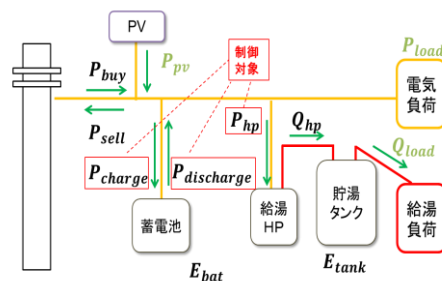


図-1 対象システム系統図

表-1 システム設備仕様

蓄電池	蓄電容量	3.88 kWh
	初期蓄電量	1.94 kWh
	充放電効率	95 %
買電価格	13時~18時	40 円/kWh
	~8時, 22時~	15 円/kWh
	上記以外	30 円/kWh
売電価格	9時~14時	10 円/kWh
	~8時, 15時~	0 円/kWh
太陽光発電モジュール	面積×枚数	1.42 m ² /枚×15枚
給湯HP	発電効率	13 %
	定格出力	4.7 kW
	容量	450 L
貯湯槽	最大	8.70 × 10 ⁴ kJ
	最小	1.74 × 10 ⁴ kJ

1.2 HEMS プログラムの概要

図-2に本研究で作成したHEMSプログラムのシステムフローを示す。任意に入力された最適運転スケジュール開始時刻に基づき、GPV数値予報データまたは気象上の実測データを取得し、日射量の直散分離を行い、PVの発電量を算出する。次に、各種シミュレーション条件を読み込み、リチウムイオン蓄電池及び給湯ASHPモデルを元に最適化の制約条件を設定する。最後に混合整数線形計画法を用いて24時間後まで10分刻みで各機器の最適運転スケジュールを算出し、出力する。

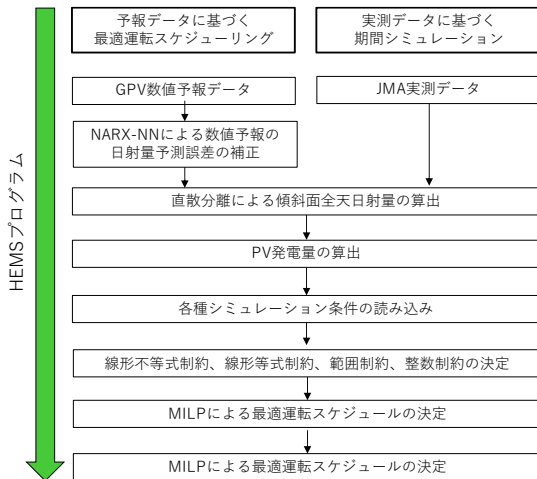


図-2 HEMS プログラムシステムフロー

1.3 混合整数線形計画法による最適化

本研究では最適化手法として混合整数線形計画法(以下MILP; (Mixed Integer Linear Programming)を用いた。MILPは数理最適化のアルゴリズムの一つで、線形計画法(LP: Linear Programming)では扱えない整数制約を扱うことができる。そのため機器の部分負荷率とON/OFFを同時に扱うことができるという利点がある。線形計画法に比べ高度で複雑なアルゴリズムであるが、探索領域が狭まるため、一般に計算時間が短くなる。本研究ではMATLAB Ver.9.1.0. (R2016b)のGlobal Optimization Toolbox Ver. 3.4.1にパッケージされているソルバーを用いた。表2にMILP計算での設計変数を示す。24時間を10分刻みで計算するため各変数には1~144の時間添え字が存在する。

表-2 MILP 設計変数

変数	記号	説明	単位
x_1	P_{buy}	買電量	[kW]
x_2	P_{sell}	売電量	[kW]
x_3	P_{charge}	充電量	[kW]
x_4	$P_{discharge}$	放電量	[kW]
x_5	E_{bat}	蓄電量	[kWh]
x_6	P_{hp}	給湯HP消費電力	[kW]
x_7	Q_{hp}	給湯HP放熱量	[kW]
x_8	E_{tank}	蓄熱量	[kJ]

1.4 MILP の定式化

1.4.1 目的関数の定式化

MATLABにおけるMILPを使用するには、以下の定式化が必要である。

$$\min_x f^T x \quad (1)$$

$$\text{sub to } \left\{ \begin{array}{l} Ax \geq b \\ A_{eq}x = b_{eq} \\ lb \leq x \leq ub \\ x(\text{intcon}) \text{ are integers} \end{array} \right\} \quad (2)$$

ここで、 f^T は目的関数係数ベクトル、 A は線形不等式制約行列、 b は線形不等式制約ベクトル、 A_{eq} は線形等式制約行列、 b_{eq} は線形等式制約ベクトル、 lb 、 ub はそれぞれ下限、上限ベクトルである。 $x(\text{intcon})$ は変数のうち整数値のみをとるものをいう。

目的関数はコスト最小化とし式(3)のように定義した。

$$J = \sum_{t=1}^m (Price_{buy,t} P_{buy,t} - Price_{sell,t} P_{sell,t}) \Delta t \quad (3)$$

ここで $Price_{buy,t}$ は時刻 t における買電単価、 $Price_{sell,t}$ は時刻 t における売電単価である。

以下に示す式(23)までの制約式を入力することで表-2に示す設計変数の最適値及び最適化した目的関数、すなわち最小コストが算出される。

システムの収支式を式(4)に示す。

$$P_{buy} + P_{bat_d} + P_{PV} = P_{sell} + P_{bat_c} + P_{HP} + P_{load} \quad (4)$$

ここで P_{PV} はPV発電量である。

1.4.2 蓄電池の定式化

図-3に本研究で用いた蓄電池のモデルを示す。

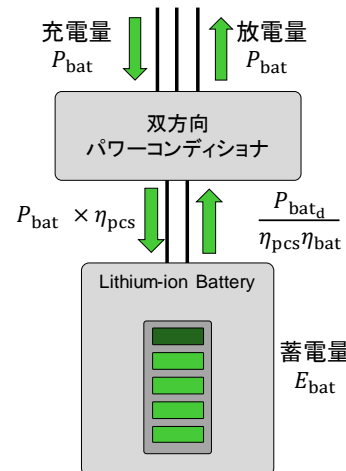


図-3 蓄電池のモデル

蓄電池へ行き来する電力は、双方向パワーコンディショナによって交流と直流が変換される際の変換効率 η_{pcs} 、

及び蓄電池の自己放電などを考慮した効率 η_{bat} によって式 (5) に示す損失が生じる。

$$E_{bat,t-1} - E_{bat,t} = \eta_{pcs} P_{bat,c,t} - \frac{P_{bat,d,t}}{\eta_{pcs} \eta_{bat}} \quad (5)$$

また、蓄電池の特性として、蓄電池の充電量及び放電量には式 (6) ~ (9) に示す上下限值がある。

$$P_{bat,c} \geq 0.5 \quad Ind_{cha} \quad (6)$$

$$P_{bat,c} \leq 2.0 \quad Ind_{cha} \quad (7)$$

$$P_{bat,d} \geq 0.5 \quad Ind_{dch} \quad (8)$$

$$P_{bat,d} \leq 2.0 \quad Ind_{dch} \quad (9)$$

ここで、 Ind_{cha} と Ind_{dch} は充放電のON/OFFを決める変数であり、0または1として与える。

過充電、過放電は故障の原因となるため、蓄電池の容量 $E_{bat} = 3.885$ kWhに対し、下限20%、上限80%として与える。

$$0.2 \times 3.885[\text{kWh}] \leq E_{bat} \leq 0.8 \times 3.885[\text{kWh}] \quad (10)$$

さらに、充電と放電が同時に起こらないように以下の制限を与える。

$$Ind_{cha} + Ind_{dch} \leq 1 \quad (11)$$

最後に、頻繁に充放電を繰り返すと、蓄電池が劣化し、最大蓄電量が低下するため、一日の充電量にも以下の制限を設けている。

$$\sum_{t=1}^m P_{bat,c,t} \leq (0.8 - 0.2) \times 3.885 \quad (12)$$

1.4.3 給湯システムの定式化

図4に本研究で用いた給湯システムのモデルを示す。ここでの設計変数は、給湯ASHP消費電力 P_{hp} 、給湯ASHP出力熱量 Q_{hp} 、貯湯槽蓄熱量 E_{tank} である。

このシステムでは、給湯負荷に対し、貯湯槽から65°Cのお湯が、水道水と混ぜて42°Cで供給される。このときのお湯の使用量に対する熱量を給湯需要熱量 Q_{hload} とし、貯湯槽から引き抜かれる。

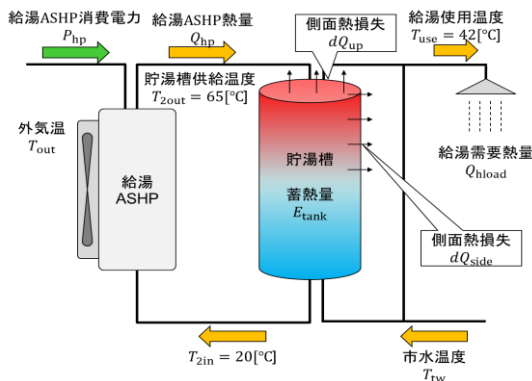


図4 給湯システムのモデル

給湯システムの熱の収支式を立てると以下となる。

$$E_{tank,t-1} - E_{tank,t} = (Q_{hp,t} - Q_{hload,t} - dQ_{up,t} - dQ_{side,t}) \Delta t \quad (13)$$

貯湯槽上面熱損失 dQ_{up} は、

$$dQ_{up} = (T_{tank,high} - T_{out}) K_{tank} S_{up} \quad (14)$$

である。貯湯槽の熱通過率 K_{tank} は円筒の熱通過率から、式 (15) のように表される。

$$K_{tank} = \frac{1}{\frac{1}{h_i r_i} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{1}{h_o r_o}} \quad (15)$$

次に、貯湯槽側面熱損失 dQ_{side} は、

$$dQ_{side,t} = (T_{tank,high} - T_{out}) K_{tank} S_{side} \frac{E_{tank,t-1}}{E_{tankmax}} \quad (16)$$

と表す。ここで最後に前時間の蓄熱量の割合 $\frac{E_{tank,t-1}}{E_{tankmax}}$ を掛けているのは、計算上は完全混合モデルを採用してはいるが、熱損失の計算においては内部で温度成層を為し温度が $T_{tank,high}$ の温水が入っている部分の側面からのみ熱損失する押し出しモデルを用いているためである。

次に、給湯ASHPのCOP特性式について示す。この式は、本研究室でのCO₂冷媒式空気熱源給湯ヒートポンプの実測によって得られたものを用いる。

$$COP = 5.442 + 0.065T_{out} - 0.029T_{in} - 0.03T_{2out} \quad (17)$$

除霜運転時の効率低下として、外気温 $T_{out} \leq 5$ °Cのときは係数 $\eta_{HPdef} = 0.8$ を掛ける。

COPの定義に従い、以下の制約式を与える。

$$COP = \frac{Q_{hp}}{P_{hp}} \quad (18)$$

また、蓄電池の場合と同様に給湯ASHPのON/OFFを制御する変数 Ind_{HP} を与え、出力の制限を設ける。

$$Q_{HP} \leq Q_{HPrate} \times Ind_{HP} \quad (19)$$

$$Q_{HP} \geq 0.3 Q_{HPrate} \times Ind_{HP} \quad (20)$$

給湯ASHPの定格出力は、

$$Q_{HPrate} = (T_{2out} - T_{2in}) c_w \rho_w m_f 2 \quad (21)$$

であり、最低出力は部分負荷率で30%とする。

最後に、タンクの貯湯量について物理的な上限値と使用量に対応するための下限値がある。

$$E_{tankmax} = \frac{c_w \rho_w T_{2out}}{3600} \times V_{tank} \quad (22)$$

$$E_{tankmin} = \frac{c_w \rho_w T_{2out}}{3600} \times V_{tank} \times 0.4 \quad (23)$$

2. 結果

2.1 制御時間刻み1時間との比較

2019年の最寒日2月8日を代表日として、1時間制御(図-5)と10分制御(図-6)のHEMSプログラムの結果の比較を行った。図中の黒線はシステムの総電力負荷を表し、主幹電力負荷と給湯HP消費電力の和で表される。図-5、図-6に共通して、総電力負荷を満たすように蓄電池から放電し、足りない場合は電力を購入している様子が確認できる。日中のPV発電量がある時間帯は負荷に対して電力が余剰するため売電価格の低い時間帯に蓄電池を充電し、それ以外の時間では売電している。図-5と図-6を比較するとトータルランニングコストが17%減少し、PV自家消費率が1%向上している。制御開始直後部分に注目すると、の蓄電池からの放電が10分制御になったことで負荷変動の追従性が向上していることが確認できる。それにより、蓄電池の充放電試行回数が多くなり、システムの蓄電効果が強調されたことがトータルコスト減少の要因と考えられる。

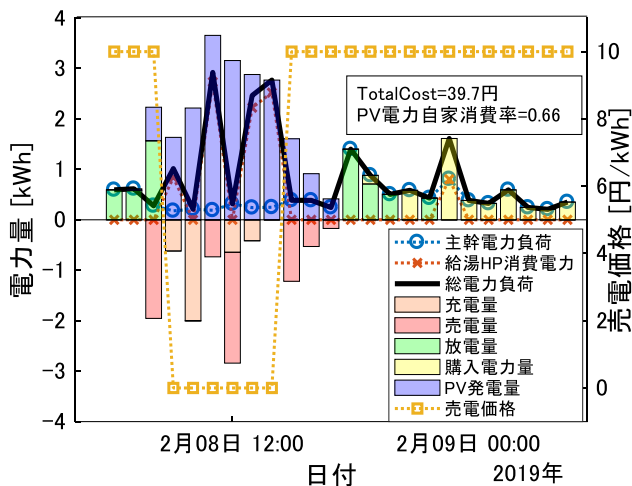


図-5 1時間制御システム結果

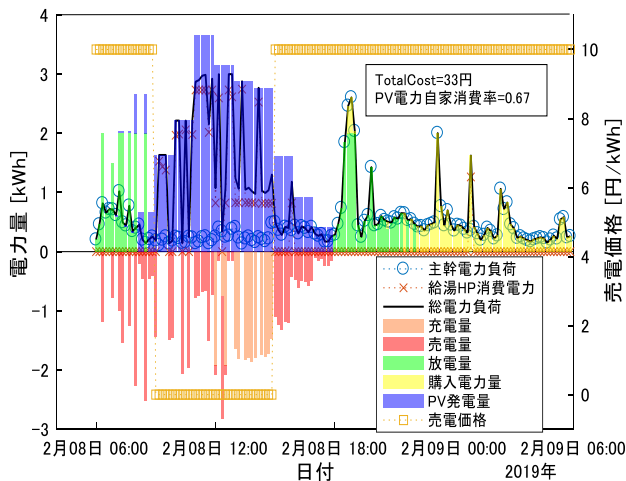


図-6 10分制御システム結果

2.2 年間シミュレーション結果

図-7に10分制御システムでの2019年の年間シミュレーション結果を示す。本システムは給湯負荷のみのシミュレーションではあるが、PV発電量が1,000 kWh/月を超えるあたりから、月当たりのランニングコストがマイナスに転じ、PV発電量が最大となる5月においてランニングコストは最低となる。6月と7月を比較するとPV発電量はほとんど同等であるが7月の方が平均気温が高く、給湯HP消費電力が小さくなるため、ランニングコストは減少している。

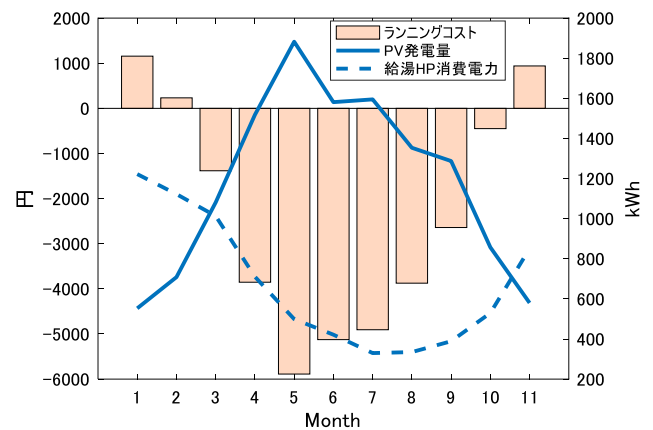


図-7 年間シミュレーション結果

3. まとめ

これまでに開発されてきた自立制御型HEMSプログラムの制御時間を10分間に改良し、その効果を検討した。2019年の最寒日の結果を1時間制御のものと比較すると、負荷の追従性の向上により、蓄電効果が強調されランニングコストが17%減少した。また、10分制御のHEMSプログラムで年間計算を行い、月当たりのランニングコストとPV発電量、給湯HP消費電力の関係を比較した。PV発電量の増加によりランニングコストが減少することが確認された。

参考文献

- 1) 中島彰栄ほか：地中熱ヒートポンプを核としたスマートコミュニティに関する研究(その8) モデル予測型HEMSを用いた都市エネルギーシミュレーション, 空気調和衛生工学会北海道支部学術講演会論文集(2019)
- 2) 中島彰栄ほか：地中熱ヒートポンプを核としたスマートコミュニティに関する研究(その7) AI手法による日射量予測を用いたモデル予測型HEMSの開発と実証, 空気調和衛生工学会北海道支部学術講演会論文集(2019)

謝辞

本研究は北海道電力総合研究所からの支援を受けたものである。また、北海道電力㈱の野川氏、大萱生氏、西村氏、北海道ガス㈱の武田氏、青木氏には、研究に関する貴重な示唆をいただきました。ここに謝意を表します。