

分散エネルギーマネジメントシステムによる 機器の最適運転計画

池上 貴志, 片岡 和人, 岩船由美子, 荻本 和彦

将来の家庭やオフィスに導入される分散エネルギーマネジメントシステムには、快適性の維持や省エネだけでなく、電力システム全体の需給バランス調整に貢献する機能が求められる。その機能の実現に向け、外部から得たインセンティブ信号に対して需要家において最大の効用を得る機器の運転計画が必要になる。本稿では、家庭内機器の最適運転計画問題とそれに対する2つの計画法による検討結果について紹介する。

キーワード：エネルギーマネジメント，混合整数線形計画，確率動的計画，運転計画問題

1. はじめに

2011年3月11日未曾有の大震災の発生により、東京電力管内では3月中10日間、過去に類を見ない規模の計画停電が実施された。電力の需要と供給のバランスを常に保つ必要がある電力システムにおいて、想定する電力需要量に対して発電所等による供給力が不足する事態が起こったためである。電力会社では、夏場の電力需要のピーク時に対応するために供給力の確保が進められている一方、節電の呼びかけを始めとする業務部門や家庭部門における需要側の調整にも注目が集まっている。

また、再生可能エネルギーの利用拡大などエネルギー供給システムの低炭素化が期待されており、我が国では太陽光発電（PV:Photovoltaics）について2030年に53GWという高い導入目標が発表されている[1]。将来、PVシステムが需要側建物に大量に導入されると、4月5月など低電力需要期の晴天日昼間にはPVで発電された電力に余剰が生じる可能性がある。電力供給側から見ると需要が非常に小さくなり、需給調整力に富む火力発電機などの運転台数が減少して電力システムの持つ需給調整力が低下してしまう[2]。PVのみならず風力発電など出力調整が難しい電源、さらにはベース電源の効果的活用など様々な観点から電力システムの需給調整力向上の必要性は大きい。このような背景のもと、家庭やオフィスなどの需要側機器の

運転制御などによって追加的な需給調整力を確保するための技術への期待は、日本のみならず世界共通の方向性である。

本稿では、このような電力需給バランス調整に貢献する家庭やオフィスにおける分散エネルギーマネジメントシステムについて紹介し、そのシステムの開発を目指した家庭内機器の最適運転計画問題について述べる。

2. 分散エネルギーマネジメントの目的

本稿で対象とする「分散」エネルギーマネジメントシステムは、電力システム全体を扱う「集中」エネルギーマネジメントシステムに対して、分散して存在する家庭やオフィスなどの個々の需要家を対象とし、集中エネルギーマネジメントと協調して運用されるものである。家庭やオフィスにおけるPVシステム等の分散電源の発電状況、各種機器のエネルギー使用状況を管理しつつ、電力システム全体の運用と連携して、最適な機器の運転計画のもとで運転制御を行うシステムである。

何をもち「最適」な運転というかは状況や目的によるが、主として以下の3つの目的があると考えている。

① 快適性の維持

家庭での生活やオフィスでの業務に支障をきたす運転制御であってはならない。温度や湿度、照度など住空間・働空間を快適に保つ機能は最低限必要な機能である。快適と感じるレベルには個人差があり、また、部屋の広さや人数、作業内容によっても快適な温度、湿度、照度は異なる。家庭の給湯システムについてみ

いけがみ たかし, かたおか かずと, いわふね ゆみこ,
おぎもと かずひこ

東京大学 生産技術研究所

〒153-8505 目黒区駒場4-6-1

ると、必要な時間に必要な量を利用できることが重要であるが、例えば入浴時間は人や家庭によって異なる。ライフスタイルやワーキングスタイル等を考慮したサービスを提供する機能が必要不可欠である。

②省エネルギーの実現

上記の快適性を維持した上で、省エネを行うことも主要な目的の一つである。過剰な空調や照明の削減、機器の効率の良い運転により省エネ効果が得られれば、家庭や事業者にとってはエネルギー費用の削減につながる。また、省エネは環境負荷低減への効果も期待できる。

自動的な運転制御による省エネルギーの他、エネルギー使用量の「見える化」によって、居住者・労働者の省エネ意識を高めることによる効果も期待されている。

③電力需給バランス調整への貢献

3つ目は、家庭やオフィスの電力利用機器を活用して、電力システム側から見て電力をあまり使っていない時間帯に電力使用を抑制し、電力をもっと使ってほしい時間帯に使用することで電力需要の時刻をシフトし、電力需給バランス調整に貢献する機能である。

需要時刻をシフトできる機器には、例えば、今後さらなる普及が進むと考えられるヒートポンプ（HP：Heat Pump）給湯機や電気自動車（EV：Electric Vehicle）などが考えられる。ヒートポンプ給湯機は、現在の運転方式では、夜間の安い電気料金の電力を使って早朝までに貯湯槽にお湯を貯め、主に夜の入浴時に多くのお湯を利用している。夜のお湯の利用時刻までに貯湯されていれば、いつお湯を沸かしても良いので、ヒートポンプ給湯機の運転時刻はその範囲内においてシフトが可能ということになる。電気自動車は、家庭の場合は帰宅してから次に車で外出するまでの間、オフィスにおいても車で出勤してから退社するまでの間、どの時間帯に充電することも可能である。

3. 外部からの情報の取得

快適性の維持と省エネの2つの機能は、快適な空間や電気料金などの形で直接的に居住者・利用者などの分散エネルギーマネジメントの実施主体が目に見える形で利益を享受できるものである。それに対して、3つ目に示した需給バランス調整に貢献する機能は、基本的には快適性を損なう電力使用の抑制を行うものではないため、需要家にとって最初の2つの機能を損な

うものではない。しかし、この機能は、エネルギーシステム全体の最適化に貢献することであり、分散エネルギーマネジメントの実施主体にとって直接的にメリットが得られるものでもない。電力システム側が望む需要シフトを分散エネルギーマネジメントによって行うためには、需要家に対して何らかのインセンティブを与える必要がある。

また、電力システム側においては、日々異なる電力需要量予測やPV発電量などの再生可能エネルギー発電量予測のもとで集中エネルギーマネジメントを行うため、需要側、つまり分散エネルギーマネジメントに求める需要シフト量も日々異なるものとなる。

電力システム側には、このインセンティブ情報と求める需要シフト量の情報の両方を需要家に送るシステムが必要であり、分散エネルギーマネジメントシステム側ではその情報を受信する仕組みが必要である。需要家に対する情報の与え方には、例えば、需要シフトに協力してくれる需要家に対して報酬を与える契約のもとで、電力システム側が直接的に要求する機器の制御量や需要シフト量を決めて需要家の機器の運転制御を行う方法（直接制御）や、需要を増加させたい時間帯の電気料金を高くし、需要を減少させたい時間帯の電気料金を安くするなど、その価格設定に応じた需要シフト量を期待することによって、要求需要シフト量の情報をインセンティブ情報に組み込んで間接的に運転制御を行う方法（間接制御）がある。

さらに、快適性の維持や、さらなる省エネの実現に向けて、現状の室温、外気温、湿度、日射量（PV発電量）などリアルタイムで取得できる情報だけでなく、天気、外気温の予測データや、PV発電量の予測データなどを取り込むことができれば、より最適な運用が可能となる。

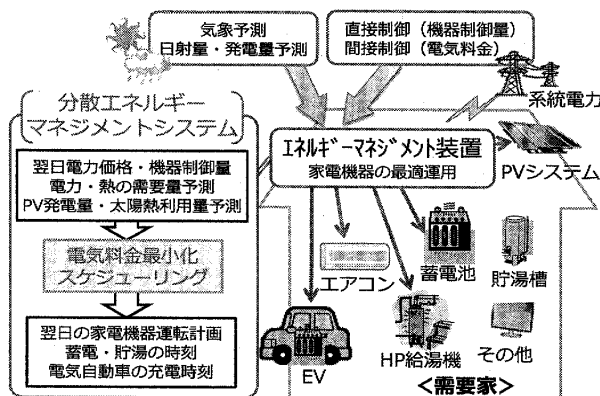


図1 分散エネルギーマネジメントシステムの具体例

このように外部からの情報を利用して、機器の運転制御に役立てる機能も分散エネルギーマネジメントシステムの重要な役割の一つである (図1参照)。

4. 機器の最適運転計画問題

4.1 問題の概要

分散エネルギーマネジメントシステムによる機器の運用方法の決定段階には、事前の情報をもとにした運転計画とリアルタイムの情報をもとにした運転調整の大きく2段階に分けられると考えている。事前に送られてくる需要シフト量、インセンティブ情報や、翌日の天気、温度、湿度などの予測データ、需要家自身の電力需要データなどの情報をもとに、最適な運転計画を立てるのが第1段階である。その計画をもとに、実際の運用において予測から外れた部分について、リアルタイムで得られる情報をもとに調整を行う運転を行うのが第2段階である。

我々が行っている研究では、現在、第1段階の運転計画の手法について検討している。現在は電気料金による間接制御を想定しており、翌日24時間分の電気料金の情報が前日の夜までに送られてきた状況における機器の最適運転計画問題について複数の手法の検討を行っている。ここでは、検討している最適運転計画問題について述べる。

ある1軒の住宅を対象とし、住空間の快適性を確保した上で制御可能な機器としてHP給湯機と蓄電池を利用できるものとする。PVシステムも導入されており、PVで発電した電力は家庭内の機器で消費され、余剰分は電力系統に売電することもできる。蓄電池は、PVで発電した電力や系統から購入した電力で充電を行うことができ、また、蓄電池から放電された電力は家庭内機器で消費するか系統に売電するものとする。また、HP給湯機で製造された温水は貯湯槽に貯められ、給湯需要に合わせて利用されるものとする。

以上の家庭内機器のシステム構成と、以下に述べる需要や機器の性能等についての条件設定のもとで、1時間ごとの機器の最適な運転方法を決定する問題である。

4.2 条件の設定

対象とする住宅を、東京都練馬区の戸建住宅1軒[4]とし、計算対象期間を2003年5月4日~10日の中間期の7日間とした。この7日間の1時間ごとの電力需要量[4]、給湯需要量[4]、給水温度[4]、外気温度[5]、PV発電量[6]の実測データを、機器の運転計

画を立てるための予測データとして扱った。

導入されるPVシステムや蓄電池、HP給湯機、貯湯槽については、次のように容量や機器性能を設定した。

まず、PVシステムは出力3kWとし、蓄電池の蓄電容量は6kWh、蓄電池の充放電容量は3kW、蓄電池の充電時ロス15%とした。また、本研究では蓄電容量の約32~84%の範囲で蓄電池を運用することとした。

貯湯槽の容量は、水量および水温を用いて決定するのではなく熱容量を用いることとした。370L程度の容積および中間期の標準的な給水温度、HP給湯機の沸上温度を考慮して、70MJ蓄熱できるものとし、湯切れ防止のため10%(7MJ)以上の蓄熱量は常に維持するものとした。なお、沸上温度は65℃とした。貯湯槽に蓄えられた熱は1時間あたり1%の熱が失われるものとした。

HP給湯機については、定格加熱能力を3kW、つまり1時間あたり10.8MJの熱を製造できるものとし、80~100%の間の出力で運転できるものとした。また、HP給湯機の効率を表す成績係数(COP: Coefficient of Performance)は、気温、沸上温度、給水温度より、次式によって各時間帯で算出して用いた[7]。

$$cop_t = k \cdot (0.175 \cdot tmp_{pair} - 0.0394 \cdot tmp_{hot} - 0.1322 \cdot tmp_{feed} + 6.637) \quad (1)$$

tmp_{pair} : 外気温度[℃], tmp_{hot} : 沸上温度[℃]

tmp_{feed} : 給水温度[℃], k : 除霜運転ロス係数

HP給湯機は、気温低下時に必要となる除霜運転によるロスを考慮するため、(1)式中の k を次式のように設定し、気温が5℃未満の場合に補正を行った[7]。

$$k = \begin{cases} 1 & (5 \leq tmp_{pair}) \\ tmp_{pair}/30 + 5/6 & (2 < tmp_{pair} < 5) \\ 0.9 & (tmp_{pair} \leq 2) \end{cases} \quad (2)$$

電力系統全体の需要が増加すると系統の発電機の運転に必要な燃料費が高くなる。これを電気料金に反映するため、電力需要に応じた限界燃料費に基づく電気料金を東京電力の設備構成により作成した[8]。この電気料金では、電力系統全体の需要が大きく、電力系統側が需要を減少させたい時間の料金が高く、そうでないときは安くなっている。図2に2003年5月5日の電気料金設定の例を示す。点線で示したのが、当該日の系統全体の電力需要をもとに算出した価格である。電力需要は早朝に小さく昼間に大きいため、電気料金も早朝で安く、昼間で高い価格となっている。将来、

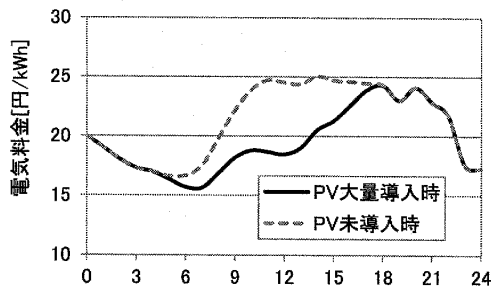


図2 2003年5月5日の電気料金の設定

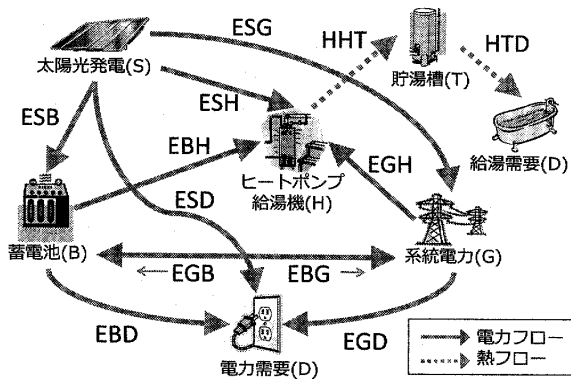


図3 家庭内機器間のエネルギーフロー

PVシステムが大量に導入されると系統側から見た需要(系統需要)はPV発電量の分だけ小さくなり、限界燃料費も安くなる。図3中に実線で示したのが、関東地域にPVシステムが15GW導入された場合のPV発電による系統需要の減少を考慮した価格である。PV未導入時の電気料金を用いる場合をケース1、PV15GW導入時の電気料金を用いる場合をケース2として、それぞれを用いて運転計画を行うこととした。なお、系統に売電する場合は、買電料金より1円/kWh安い価格で売電するものとした。

以上の条件設定のもとで、家庭内の電気料金が最も安くなる機器の運転方法を決定することとし、混合整数線形計画法(MILP: Mixed Integer Linear Programming)および確率動的計画法(SDP: Stochastic Dynamic Programming)を用いた2つのモデルを開発して検討している[9]。モデルの概略と適用結果について紹介する。

4.3 混合整数線形計画(MILP)法の利用

家庭内の機器および系統電力との間のエネルギーフローを図3のように表現し、それぞれのエネルギーフローの1時間値を最適化によって求めることとした。実線矢印は電力フロー、点線矢印は熱フローを表している。目的関数、制約条件を以下に示す。

【目的関数】

$$\begin{aligned} \text{minimize} : & \sum_t prb_t \cdot (EGB_t + EGH_t + EGD_t) \\ & - \sum_t prs_t \cdot (ESG_t + EBG_t) \end{aligned} \quad (3)$$

【制約条件】

$$ESB_t + ESH_t + ESD_t + ESG_t = gpv_t \quad (4)$$

$$ESD_t + EBD_t + EGD_t = dme_t \quad (5)$$

$$ESB_t + EGB_t \leq cpb_{io} \quad (6)$$

$$EBH_t + EBD_t + EBG_t \leq cpb_{io} \quad (7)$$

$$0.32 \cdot cpb_{en} \leq STE_t \leq 0.84 \cdot cpb_{en} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} STE_t - STE_{t-1} = & (1 - 0.15) \cdot (ESB_t + EGB_t) \\ & - (EBH_t + EBD_t + EBG_t) \end{aligned} \quad (9)$$

$$0.8 \cdot cph_{io} \cdot OPI_t \leq HHT_t \leq cph_{io} \cdot OPI_t \quad (10)$$

$$0.1 \cdot cpt_{en} \leq STH_t \leq cpt_{en} \quad (11)$$

$$STH_t - (1 - 0.01) \cdot STH_{t-1} = HHT_t - dmh_t \quad (12)$$

$$STH_{t-1} \geq HTD_t \quad (13)$$

$$3.6 \cdot cop_t \cdot (ESH_t + EBH_t + EGH_t) = HHT_t \quad (14)$$

$$STE_0 = STE_{hr} \quad (15)$$

$$STH_0 = STH_{hr} \quad (16)$$

$$(t=1, 2, \dots, hr) \quad (\text{All variables are } \geq 0)$$

【入力データ】

prb : 買電価格[¥/kWh], prs : 売電価格[¥/kWh]
 gpv : PV発電量[kWh], dme : 電力需要量[kWh]
 dmh : 給湯需要量[MJ], cpb_{io} : 充放電容量*1h[kWh]
 cpb_{en} : 蓄電容量[kWh], cpt_{en} : 貯湯容量[MJ]
 cph_{io} : HP定格加熱能力*1h[MJ], cop : HPのCOP

【決定変数】

$E[X][Y]^*$: [X]から[Y]への電力量[kWh]

$H[X][Y]^*$: [X]から[Y]への温熱量[MJ]

STE : 蓄電量[kWh], STH : 蓄熱量[MJ]

OPI : HP給湯機運転指標(バイナリ変数)

* [X], [Y]は, G: 電力系統, S: PVシステム, D: 需要, B: 蓄電池, H: HP給湯機, T: 貯湯槽, を表す(図2に対応)。

目的関数, 制約条件ともにすべて線形となっているが, (10)式中に, HP給湯機のON/OFFの指標であるバイナリ変数 OPI を用いたため混合整数計画となっている。ソルバーとして Gurobi Optimizer 4.0 を用いた。

4.4 確率動的計画(SDP)法の利用

実際のエネルギーマネジメントシステムでは, 需要データやPV発電量データ等是不確実性を含んだ予測値を利用することになるが, SDP法では予測データを確率的に扱うことができる。ただし, 本稿ではMILP法との比較を行うため, 確率的手法は用いてい

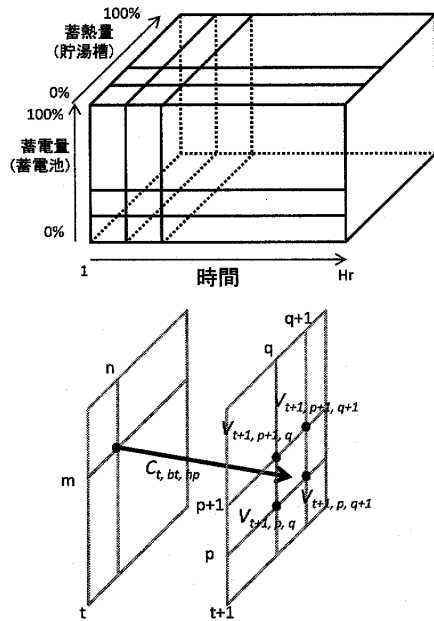


図4 本モデル中の動的計画法の概要

ない。

HP 給湯機の運転と蓄電池の充放電の時刻が重要であるので、本モデルでは、蓄電量と蓄熱量をパラメータとし、この2つのパラメータの最適な変遷ルート、後退型動的計画アルゴリズムを用いて決定した。

まず図4上のように、時刻、蓄電量、蓄熱量を軸とする3次元格子を考え、各格子点における評価値である最小電気料金を図4下および次の再帰式により計算する。

$$V_{t,m,n} = \min [C_{t,bt,hp} + V'_{t+1,m+bt,n+hp}] \quad (17)$$

$$V_{hr,m,n} = \min [C_{t,bt,hp}] \quad (18)$$

$$V'_{t+1,m+bt,n+hp} = (1-r_1)(1-r_2) \cdot V_{t+1,p,q} + r_1(1-r_2) \cdot V_{t+1,p+1,q} + (1-r_1)r_2 \cdot V_{t+1,p,q+1} + r_1r_2 \cdot V_{t+1,p+1,q+1} \quad (19)$$

($t=1, 2, \dots, hr-1$)

$$C_{t,bt,hp} = \begin{cases} prb_t \cdot EP_{t,bt,hp} & (EP_{t,bt,hp} \geq 0) \\ -prst \cdot EP_{t,bt,hp} & (EP_{t,bt,hp} < 0) \end{cases} \quad (20)$$

$$EP_{t,bt,hp} = dme_t - gpv_t + \frac{ohp_{t,hp}}{3.6 \cdot cop_t} + obt_{t,bt} \quad (21)$$

($t=1, 2, \dots, hr$)

V, V' : 格子点, 格子外点における評価値[¥]

C : 電気料金[¥], EP : 電力取引量[kWh]

ohp : HP 給湯機熱製造熱量[MJ]

obt : 充放電量[kWh] (充電時正, 放電時負)

時刻 t における計算では、まず $-3\text{kW} \sim 3\text{kW}$ の間で 10W 刻みの充放電量 bt と定格の 0% および $80\% \sim 100\%$ の間で 0.5% 刻みの HP 給湯機による熱製造量

hp を決める。決定した運転量に対して、その時間帯の電気料金 C を(20)(21)式で計算する。また、時刻 t において蓄電量 m 、蓄熱量 n であった状態が、それらの運転により充電時ロスや放熱ロス等も考慮することで時刻 $t+1$ において到達する点、蓄電量 $m+bt$ 、蓄熱量 $n+hp$ を求め、この点における評価値を(19)式によって計算する。評価値は格子点においてのみ算出されているため、時刻 $t+1$ 、蓄電量 $m+bt$ 、蓄熱量 $n+hp$ における評価値 V' は、その点を囲む4つの格子点における評価値を2次元線形補間して算出する。これに電気料金 C を加えた値が時刻 t 、蓄電量 m 、蓄熱量 n の点における評価値の候補となり、すべての充放電量 bt 、熱製造量 hp においてこれを算出し、最小値をこの点における評価値とする。

以上の計算において、後退法によりすべての格子点における評価値が算出されるが、この段階では最適経路は確定していない。そのため最後に、得られた格子点における評価値と2次元線形補間を用いて、前進法により格子点以外の点も通過する最適経路を決定した。

本モデルにおける計算は格子点以外の点の評価値を線形補間で計算するため、厳密な最適解を得るためには、格子点の数を増加させることで可能となる。今回の計算では、格子点の数は、蓄電量については蓄電容量の $32\% \sim 84\%$ の間で 1% 間隔、蓄熱量については貯湯槽容量の $10\% \sim 100\%$ の間で 4.5% 間隔としている。

4.5 計算結果

MILP 法および SDP 法を用いて、それぞれケース1, ケース2の電力料金のもとで計算を行った。MILP 法によるケース1およびケース2の5月4日から4日間の計算結果を図5, 6に示す。上段は、限界燃料費をもとにした1時間ごとに変動する電力価格を表している。中段は電力量に関するグラフで、1時間ごとの電力需要量(棒), PV 発電量(太実線), 購入電力量(×付き実線), 売却電力量(○付き実線), 蓄電量(点線)を示している。下段は熱量に関するグラフで、給湯需要量(棒), HP 給湯機の運転によって貯湯槽に送られた熱量(太実線), 蓄熱量(点線)を示しており、蓄熱量のみ右軸の数値を指している。

ケース1では、基本的に深夜から早朝にHP給湯機を運転するが、昼間の電気料金が25円を下回る5月5日は、昼間の気温が高くHP給湯機のCOPが向上しているため、夜間よりやや電力価格が高くても昼間にHP給湯機を運転することが分かる。PV発電量を考慮したケース2の結果では、天候が悪くPV発電量

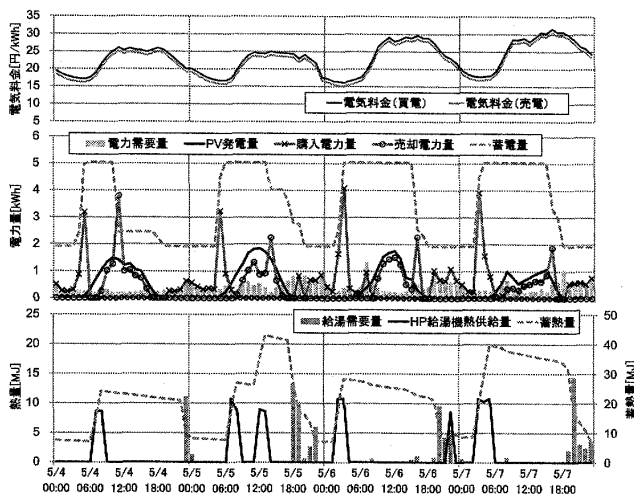


図5 MILP法によるケース1 (PV未導入時料金) の結果

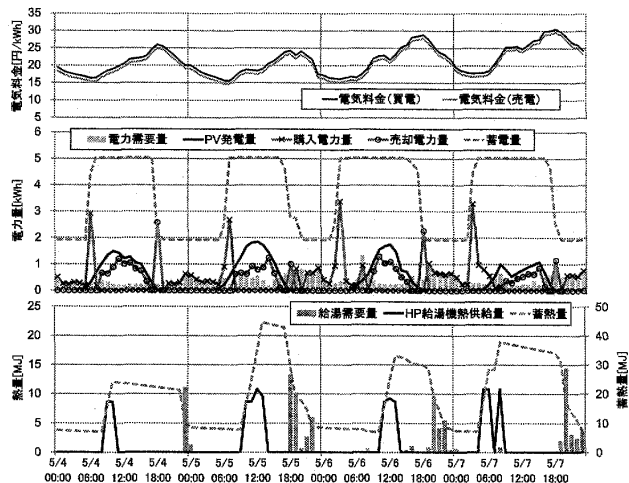


図6 MILP法によるケース2 (PV大量導入時料金) の結果

が少ない7日は早朝にかけてHP給湯機を運転するが、それ以外の日は昼間の電気料金がケース1よりさらに安くなるので、昼間にHP給湯機を運転することが分かる。

蓄電池の利用については、ケース1もケース2も1日1サイクル充放電が行われており、電気料金が1日で最も低い早朝に充電されていることが分かる。放電については電気料金の高い時間帯から行われており、ケース1では主に昼または夕方、ケース2では主に夕方から夜となっている。PV発電により電気が余る昼間の時間帯での放電が夜間にシフトしていることにより、ケース2ではPV発電による余剰電力の低減につながり、電力システム全体に貢献できることが確認できる。

2つのモデルによる運転計画を比較するため、蓄電

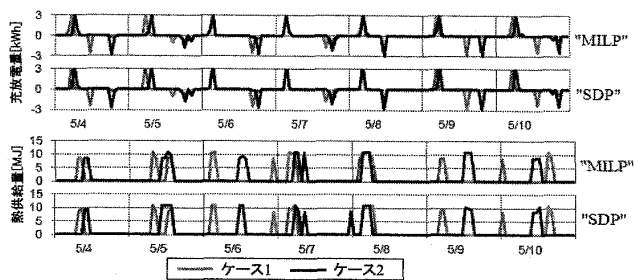


図7 蓄電池とHP給湯機の運転計画の相違

池の充放電量およびHP給湯機による熱供給量について図7に示す。蓄電池の運用については、MILP法もSDP法もほぼ同じ運転計画であった。蓄電に関してはSDP法による格子点の解像度が高いため最適解に近い解が得られているということである。一方、HP給湯機の運転計画は2つのモデルでやや異なっていた。SDP法ではHP給湯機の運転量が離散的であり、また蓄熱量に関する格子点の間隔が比較的広い点が原因と考えられる。どちらの結果においても、ケース1の価格設定をケース2の価格設定にすることにより、晴天日のHP給湯機の運転時刻を早朝から昼間にシフトできており、需要シフトにはどちらのモデルも有効であることが確認できた。

5. おわりに

分散エネルギーマネジメントシステムによる機器の最適運転制御の実現に向けて、オペレーションズ・リサーチの担う役割は大きい。本稿では、電力料金設定に基づく需要シフトによる電力需給バランス調整への貢献を想定し、家庭内機器の最適運転計画問題について2つの計画法による検討を紹介した。

MILP法では、機器のON/OFFの情報を表すバイナリ変数を利用することが容易であるため、機器の起動時のロスや頻繁なON/OFFが起こらない設定などを制約条件に加えることで、より現実的な機器の運転に近づけることが可能である。一方、SDP法では、本稿では扱わなかった確率的データを用いることで、需要やPV発電量に関する予測の不確実性を容易に考慮することが可能である。また、家庭内にはインバータなど非線形な性能を持つ機器も多く、MILP法では扱うことができない要素も扱うことができる。

このように、今後はそれぞれの計画法の特徴を生かし、そして様々な手法を取り入れることによって、現実の機器運用の再現性が高く、実現可能なものへの改良に取り組んでいきたい。

参考文献

- [1] 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 需給部会：長期エネルギー需給見通し（再計算），平成 21 年 8 月，2009.
- [2] 荻本和彦：低炭素社会における電力システム，電気学会，129(1)，16-19，2009.
- [3] 池上貴志，岩船由美子，荻本和彦：電力需給調整力確保に向けた家庭内機器最適運転計画モデルの開発，電気学会論文誌 B，130(10)，877-887，2010.
- [4] 日本建築学会：住宅内のエネルギー消費量データベース，電力消費量・ガス消費量・給水温度 15 分データ，関東戸建 03，2009.
- [5] 気象庁，気象統計情報：アメダス（気温）1 時間値，観測点（練馬），2003.
- [6] 独立行政法人産業技術総合研究所：広域分散型電源としての太陽光発電システムの利用可能性の調査，平成 19 年度独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書，2008.
- [7] 所健一，池谷知彦，三田裕一：蓄電池併設ヒートポンプ式給湯機のユニット構成最適化ツールの開発と蓄電池の限界コスト試算，電力中央研究所報告，R08026，1-16，2008.
- [8] 荻本和彦，大関崇，植田譲：太陽光発電大量導入の電力システムの運用コストに与える影響試算，第 26 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集，17-4，1-4，2010.
- [9] 池上貴志，片岡和人，岩船由美子，荻本和彦：電力需給バランス制御に貢献する家庭内機器最適運転モデルの評価，電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料，PSE-10-184，119-124，2010.