

冷熱蓄熱システムの実時間最適制御による 電力系統安定化への貢献に関する研究

Research on contribution to power system stabilization
by real-time optimal control of cold thermal energy storage systems

水野 竣介 *・前 匡 鴻 *・松橋 隆 治 *
Shunsuke Mizuno Masahiro Mae Ryuji Matsuhashi

Abstract

With the rapid spread of renewable energy in recent years, the need for electricity supply and demand adjustment is increasing. In particular, thermal storage systems can be combined with various other systems to create highly efficient heat sources, and are expected to be utilized in demand response as a demand and supply adjustment capability possessed by consumers. The aim of this study is to suppress electricity costs and stabilize the power system by optimally controlling residential freezers in accordance with actual electricity market prices. First, the temperature transition of a household freezer when switched on and off was measured by using Raspberry Pi 4 and identified assuming that it is a first-order delay system. Next, a real-time optimal control model was constructed by mixed integer linear programming, considering the freezer's temperature limit as a constraint condition. As a result, a control method for freezers that reduces electricity costs the most was established.

Key words : Energy, Heat, Demand Response, Optimization, Energy Storage

1. 序論

1.1 研究の背景

2030年には2013年比で46%のCO₂を削減し、また2050年にカーボンニュートラルを達成するという国の目標実現に向け、CO₂排出量の少ない電力システムの構築が求められている。これらの目標を達成するには、再生可能エネルギーの導入の拡大が不可欠であり、近年では太陽光発電や風力発電などが国内でも急速に普及し始めている。しかし、これらの電源は、天候などによって発電量が大きく変わるため、刻々と変わる天候と発電量に合わせた細やかな需給コントロールが必要になっている¹⁾。そのため、再生可能エネルギーを中心に電源の分散化が加速化している中で、昼間を中心とした電力需給調整のニーズが高まっている。一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センターによると、その中でも蓄熱システムは、ほかの様々なシステムと組み合わせ、効率の高い熱源を構築することが可能であり、需要家が持つ需給調整力として、Demand Response (DR: デマンドレスポンス)での活用が期待されている²⁾。DRとは、需要家エネルギーリソースの保有者もしくは第三者が、需要家エネルギーリソースを制御することで、電力需要パターンを変化させることである²⁾。需要を抑制することを下げDR、需要を創出することを上げDRという。

蓄熱を行うことで、熱源機を停止し、放熱運転を行う下げDR、そして熱源機を稼働し、蓄熱運転を行う上げDRを実現することが可能となる。

また、蓄熱システムはVPP(仮想発電所)としての活用も期待され、需給調整市場に参入するポテンシャルを持つ。VPP(仮想発電所)とは、需要家側エネルギーリソース、電力系統に直接接続されている発電設備、蓄電設備の保有者もしくは第三者が、そのエネルギーリソースを制御(需要家側エネルギーリソースからの逆潮流も含む)することで、発電所と同等の機能を提供するものである³⁾。需給調整市場とは、一般送配電事業者が電力供給区域の周波数制御・需給バランス調整を行うために必要となる調整力について、多くの電源などへの参加機会の公平性確保、調整コストの透明性・適切性の確保の観点から、エリアを超えて公募により広域的に調達するための市場のことである⁴⁾。需給調整市場については、現在、応動時間の長い三次調整力①、②において取引が開始されており、蓄熱を活用したDRは三次調整力②での活用が期待されている。ヒートポンプ蓄熱システムは、1000MW級の下げDRのポテンシャルがあるとされており、注目を集めている²⁾。その他には、容量市場の発動指令電源として算入できる可能性も期待されている。発動指令電源とは、単体の期待容量が1000kW未満の電源・安定的供給力を提供できない自家発・DRなどを単独または組み合わせることで、期待容量が1000kW以上の供給力を提供するもののことである²⁾。

*東京大学工学部電気電子工学科
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1
E-mail: mizuno@enesys.t.u-tokyo.ac.jp

1.2 研究の目的

ヒートポンプ蓄熱システムの活用先としては冷暖房や給湯設備も考えられるが、本論文では冷凍冷蔵倉庫に注目したい。冷凍冷蔵倉庫は特に消費電力が高く、蓄熱システムとしてのポテンシャルが非常に高い。具体的には、日本卸電力取引所（Japan Electric Power Exchange : JEPX）でのスポット市場価格が高い夕方に冷凍機の稼働を停止し、放熱運転を行う。そして、スポット市場価格が安価になっている昼間に電動冷凍機を稼働し、蓄熱運転を行う。JEPXとは、電気の取引を行う市場のことであり、そのスポット市場価格は、近年では太陽光発電などの再生可能エネルギーによる余剰電力が発生する昼間に安く、需要が増加する夕方に高くなる傾向がみられる。冷凍冷蔵倉庫をこのように最適に制御することにより、冷凍冷蔵倉庫が蓄電池のように機能するため、年々増加している昼間の余剰電力をうまく有効活用するとともに、冷凍冷蔵倉庫を持つ業者の電気代の負担を軽減することが可能となる。

冷凍冷蔵倉庫の制御に関して、Miha Glavanらは、スーパーマーケット全体の電力ピークを管理するために、冷凍システムの電力需要の制御可能性を検証し、空気と貯蔵品の温度制限を考慮しながら、冷凍機の電力需要を短期的に調整する手法を提案した⁵⁾。また、Nadina Baghināらは、家庭用冷凍庫の運転に需要応答を適用することに焦点を当て、デマンドレスポンス応用のためのリアルタイム予測制御モデルを提案した⁶⁾。しかし、実際の電力市場の値動きに合わせて最適に冷凍冷蔵倉庫を制御する研究は見られない。そこで本論文では、冷凍冷蔵倉庫を対象として、実際の電力市場（JEPX）の価格変化に合わせて、最も電気料金が低くなるように出力を制御するモデルを提案することを目的とする。そして社会的には電力需給のアンバランスを解消するカーボンニュートラルな電力システムの構築、経済的には近年燃料価格により高騰している電気料金の抑制を目指す。

2. 実験装置

2.1 家庭用冷凍庫の温度推移のモデル化

本論文では、最終的に大型の冷凍冷蔵倉庫に対して、冷熱を蓄熱させて JEPX の価格変化に合わせた最適な制御を行うことを目指すが、まずは家庭用冷凍庫における最適化モデルを構築し、電気料金の最小化を行った。最適化モデルの構築に先立ち、家庭用冷凍庫の電源のオン・オフを切り替えた際の温度の推移を調べ、家庭用冷凍庫の制御モデルをシステム同定した。研究にあたっては、PF-A31FD-B（アイリスオーヤマ製）を用いた。冷凍庫の回路図を図 1 に示す。

外気温については、空調の設定温度を 28℃にしておき、

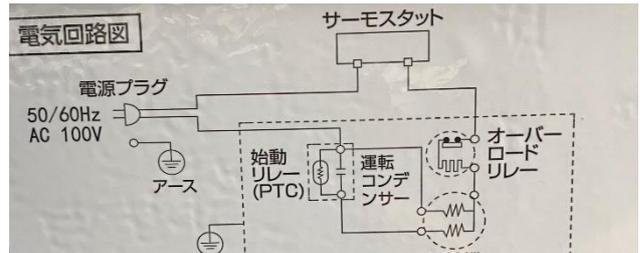


図 1 実験に使用した家庭用冷凍庫の回路図

室内の温度を一定に維持するように努めた。また、庫内には何も貯蔵品を入れず、実験中に冷凍庫を開けないようにした。庫内には温度センサー（ADT7410）を設置し、Raspberry Pi 4 Model B を PC と SSH 接続し、冷凍庫のスイッチのオン・オフを切り替えた時の温度の推移を調べた。そして、測定した日時とその時の温度のデータを 1 秒ごとに記録し、CSV ファイルに保存するプログラムを Python 3 で書き、実行した。なお、冷凍庫をオンにした時の出力は最大値” に設定した。

実験の様子を図 2 に示す。

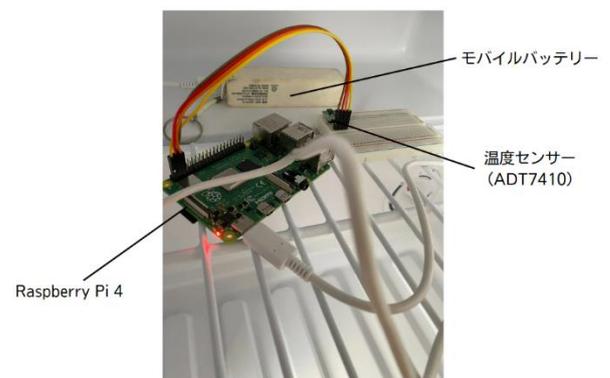


図 2 実験の様子

続いて、冷凍庫の温度推移のモデルを、入力と出力の関係が 1 階の線形微分方程式で表現される一次遅れ系のシステムであると仮定し、フィッティングによる近似を行った。冷凍庫の温度推移のモデルが一次遅れ系であるとき、冷凍庫のスイッチをオン・オフするモデルはステップ応答であるとみなすことができ、

システムの伝達関数を

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} \quad (K: \text{ゲイン}, T: \text{時定数}, \tau: \text{むだ時間})$$

と仮定すると、このシステムにステップ入力

$$U(s) = \frac{1}{s}$$

を与えた時、出力は

$$Y(s) = G(s)U(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)} e^{-\tau s}$$

となる。これを逆ラプラス変換して、実際の温度の出力は、

初期値を 0°C としたとき、

$$y(t) = K \left(1 - \exp \left(-\frac{t - \tau}{T} \right) \right)$$

と求められる。

初期値の温度の値を考慮して、関数が

$$A - B \exp \left(-\frac{t - \tau}{T} \right)$$

を満たすようにフィッティングを行い、冷凍庫の温度推移モデルを同定した。フィッティングに当たっては、python の scipy ライブラリにある curve_fit を用いた。curve_fit は、非線形最小二乗法によってフィッティングを行う機能を持つ⁷⁾。

3. JEPX のスポット市場価格を考慮した家庭用冷凍庫のリアルタイム最適制御

3.1 家庭用冷凍庫における制御の最適化モデルの構築

続いて、前項で特定した冷凍庫の温度推移のモデルを用い、家庭用冷凍庫における制御の最適化モデルの構築を行った。本論文では、東京電力管内を対象として、市場連動型の料金メニューである【市場ハイブリッドプラン（市場連動 100%）】のプランをもとに最適化モデルを構築した。

この電気料金プランは、高圧、特別高圧の事業者を対象としたものである。本来はこれに別途再生可能エネルギー発電促進賦課金に加わるが、最適化のプロセスにはほとんど影響しないため、本論文では考慮しない。基本料金は、東京電力の定める基本料金単価に契約電力（市場連動契約電力）を乗じ、力率による割引・割増を加味して算定している。基本料金単価は 2175.71 円/kWh とし、力率割引の値は 0.85 とした。電力量料金は、JEPX のスポット市場価格に対応する料金体系となり、

電力量料金 = 使用電力量

$$\times \left[\begin{array}{l} \text{託送供給等約款の電力量料金単価} \\ + \frac{\text{市場平均価格}}{1 - \text{損失率}} + \text{消費税等相当額} \end{array} \right]$$

の式で表すことができる。託送供給等約款の電力量料金単価は、昼間時間で 4.87 円/kWh、夜間時間で 4.63 円/kWh である⁸⁾。消費税は 10%、損失率は 3.9% (高圧) である⁹⁾。

また、市場平均価格として、東京エリアでの 2023 年 9 月 24 日のスポット市場価格を用いた。モデルを組むにあたって、MATLAB Optimization Toolbox の intlinprog 関数を用いた。2023 年 9 月 24 日の 1 日の電気料金を目的関数とし、その最小化を行った。表 1 に、最適化モデルに用いた変数を示す。

表 1 最適化モデルに用いた変数の値

変数・引数名	内容	単位
t	1 日の中での 10 分タイムスロットを表す番号	1, 2, ..., 144
W	冷凍庫の消費電力	kW
$P(t)$	各タイムスロット毎の東京エリアのスポット市場価格	円/kWh
$on(t)$	冷凍庫のスイッチがオンかオフかを示す二値変数	オフ時:0, オン時:1
$T(t)$	各タイムスロット毎の庫内の温度	°C
$f(T)$	冷凍庫のスイッチをオンにした際の庫内の温度推移のモデル	°C
$g(T)$	冷凍庫のスイッチをオフにした際の庫内の温度推移のモデル	°C
ξ	$f(T(t-1)) - g(T(t-1))$ を示す	°C
η	$on(t) \times \xi$ を示す	°C
ξ_{max}	制約条件に用いる定数	ここでは 5500

今回は簡単のため、託送供給等約款の電力量料金単価の平均化を行い、一定であるとみなした。下記に目的関数を示す。

$$\text{電気料金} = \frac{2175.71 \times W \times 0.85}{30}$$

$$+ W \sum_{t=1}^{144} \left(\frac{P(t)}{1 - 0.039} \times 1.1 + 4.75 \right) \times on(t) dt$$

以下、制約条件について述べる。

今回は、庫内が常に -15°C 以下となるように制限した。

今回の最適化モデルは、そのまま解くと非線形となるため、McCormick envelopes を用いて線形への変換を行った¹⁰⁾。

その結果、制約条件は以下の通りとなった.

$$\begin{aligned} \xi &= f(T(t-1)) - g(T(t-1)) \\ T(t) &= \text{on}(t)f(T(t-1)) + (1 - \text{on}(t))g(T(t-1)) \\ &= g(T(t-1)) + \text{on}(t) \times \xi \\ &= g(T(t-1)) + \eta \\ -\text{on}(t) \times \xi_{\max} &\leq \eta \leq \text{on}(t) \times \xi_{\max} \\ \xi &\leq \eta \leq \xi + (1 - \text{on}(t)) \times \xi_{\max} \end{aligned}$$

4. 結果と結論

4.1 家庭用冷凍庫を用いた基礎実験による温度推移のモデルの同定

図 3, 図 4 に冷凍庫のスイッチをそれぞれオン, オフに切り替えた時の温度変化の推移を示す.

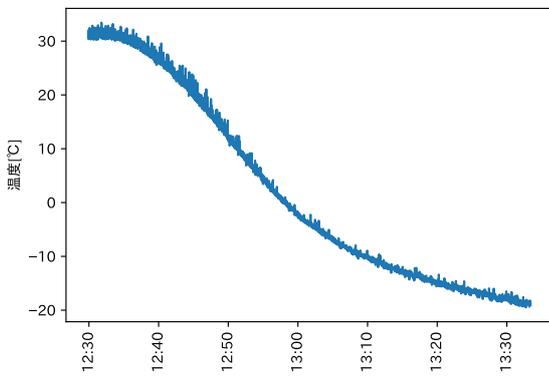


図 3 冷凍庫のスイッチをオンにした時の温度変化の推移

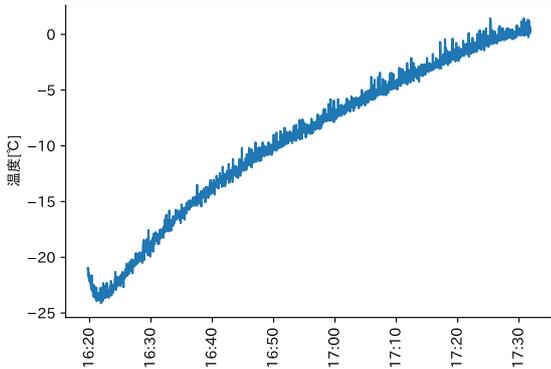


図 4 冷凍庫のスイッチをオフにした時の温度変化の推移

次に、むだ時間を考慮したうえで、上記の図 3, 図 4 のグラフにフィッティングを行った。フィッティングした結果、冷凍庫をオンにした時のモデルは、スイッチをオンにした時間を 0 として、

$$y(t) = -24.7 + 54.6 \exp\left(-\frac{t-300}{1910}\right) (t \geq 300)$$

でむだ時間は 300 秒となった。このモデルの伝達関数は

$$G(s) = \frac{54.6}{1910s + 1} e^{-300s}$$

と表せる。

オフにした時のモデルは、スイッチをオフにした時間を 0 として、

$$y(t) = 17.9 - 38.8 \exp\left(-\frac{t-200}{4750}\right) (t \geq 200)$$

でむだ時間は 200 秒となった。このモデルの伝達関数は

$$G(s) = \frac{-38.8}{4750s + 1} e^{-200s}$$

と表せる。表 1 に同定したパラメータの値を示す。

表 2 家庭用冷凍庫のオン・オフモデルのパラメータの値

名称	記号	オン時のパラメータの値	オフ時のパラメータの値
オフセット係数	A	-24.7	17.9
ゲイン	B	-54.6	38.8
時定数	T	1910	4750
むだ時間	τ	300	200

これらのグラフから、ほとんどの地点でフィッティング関数が誤差 10%以内収まっていることがわかり、冷凍庫の温度推移のモデルは一次遅れ系であることが示された。

4.2 混合整数線形計画法による家庭用冷凍庫のリアルタイム最適制御モデルの評価

同定した家庭用冷凍庫の温度推移のモデルの結果から、

$$\begin{aligned} f(T) &= -24.7 + (T + 24.7) \times e^{-\frac{600}{1910}} \\ g(T) &= 17.9 - (17.9 - T) \times e^{-\frac{600}{4750}} \end{aligned}$$

とした。また、今回のモデルでは、簡単のため、冷凍庫の消費電力を 60W で一定とし、むだ時間を考慮せずに最適化を行った。最適化を行った際の、冷凍庫内の温度推移及びその時の東京エリアにおける電力のスポット市場価格を図

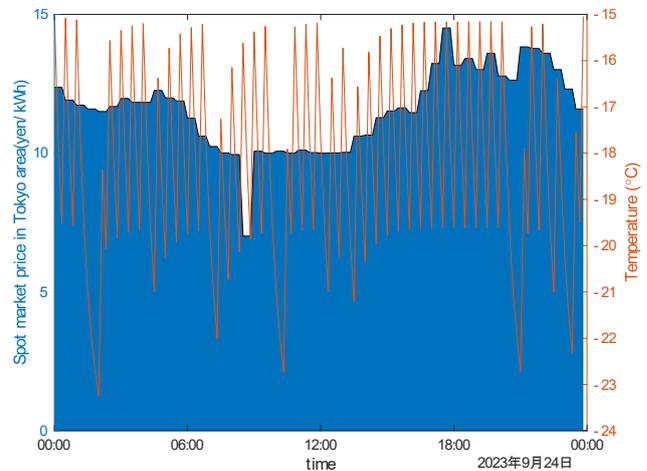


図 5 最適化を行った際の、冷凍庫内の温度推移及びその時の東京エリアにおける電力のスポット市場価格

5に示す。

グラフより、基本的には冷凍庫のスイッチを20分オンにして10分オフにすることを繰り返しているが、スポット市場価格が低くなっている昼間や深夜帯を中心に、オンにする時間を増加させ、冷凍庫の過冷却を行っていることがわかる。結果より、一日の合計の電気料金は21.6円となった。

最適化を行わなかった場合の電気料金の合計は29.5円であるため、最適に制御を行うことにより、電気料金を約73%に下げられることが明らかとなった。しかし、今回の研究で使用した家庭用冷凍庫の時定数が非常に小さいものであったため、十分な時間冷熱を蓄熱することができず、昼間に蓄熱して夕方に放熱を行うという、本論文で理想としていた結果には至らなかった。

5. 今後の展望

まずは、SP11(SwitchBot)のスマートプラグを用い、冷凍庫の消費電力を測定することで、より正確な最適化モデルを今後組んでいきたい。そして、得られた家庭用冷凍庫の制御の最適化モデルを実際の冷凍庫を用いて検証し、抑制する電気料金がモデルによるシミュレーション結果と等しいかを、プログラムをRaspberry Piに読み込ませ、スマートプラグを制御することで検証したい。

また、大手電力会社は、デマンドレスポンスに協力した事業者に対して報酬を与える仕組みを整えており、そうした仕組みへの参加が、電気料金の負担の軽減化にどれほど寄与するか検証したい。

最後に、冷凍冷蔵倉庫を(VPP)仮想発電所として機能させたときの効果などについても今後検討していきたい。

謝辞

本論文の一部は、NEDO Entrepreneurs Programの助成を受けて実施された。

参考文献

1) 資源エネルギー庁；これからの需給バランスのカギは、電気を使う私たち～「ディマンド・レスポンス」とは？、

(2022), <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/dr.html>(アクセス日 2023.09.16)

2) 一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センター；蓄熱システムを活用したdr対応と電力取引市場について、(2023)

3) 資源エネルギー庁；Vpp・drとは、(2023), https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/advanced_systems/vpp_dr/about.html(アクセス日 2023.09.16)

4) 送配電網用協議会；需給調整市場とは、(2022), <https://www.tdgc.jp/jukyuchoseishijo/outline/outline.html>(アクセス日 2023.09.16)

5) Miha Glavan, Dejan Gradišar, Iztok Humar, and Damir Vrančić; Refrigeration control algorithm for managing supermarket's overall peak power demand, (2019 9), pp. 2279–2286, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 27

6) Technische Universitat Berlin. SENSE Lab and IEEE Power & Energy Society; 2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe) : Berlin, Germany : October 14-17, (2012), IEEE

7) The Scipy community; scipy.optimize.curve_fit, (2016), https://docs.scipy.org/doc/scipy-0.18.1/reference/generated/scipy.optimize.curve_fit.html(アクセス日 2023.09.20)

8) 東京電力パワーグリッド；託送供給等約款の見直し概要, (2023), <https://www.tepco.co.jp/pg/company/press-information/press/2022/pdf/221227j0101.pdf>(アクセス日 2023.09.22)

9) 東京電力パワーグリッド；託送供給等約款, (2021), https://www.tepco.15co.jp/pg/consignment/notification/pdf/takusou_yakkan0716.pdf(アクセス日 2023.09.22)

10) Shunbo Lei, Chen Chen, Yupeng Li, and Yunhe Hou; Resilient disaster recovery logistics of distribution systems: Co-optimize service restoration with repair crew and mobile power source dispatch, (2019 11), pp. 6187–6202, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 10