

複数家庭で構成される電力システムの蓄電池を用いた出力平滑化制御*

山口 佳彦^{†‡}・薄 良彦[†]・引原 隆士[†]

Battery-Based Output Smoothing Control of Electric Power System with Multiple Homes*

Yoshihiko YAMAGUCHI^{†‡}, Yoshihiko SUSUKI[†] and Takashi HIKIHARA[†]

This paper addresses output smoothing control of an electric power system with multiple homes. The notion of home is a unit of small-scale power system closed to consumers. A home consists of local renewable-based energy source, energy storage, load, power conversion circuit, and control system. Output smoothing control aims to regulate the output power of a single home or coupled multiple homes to the outside of it and is expected to reduce the influence of fluctuating renewable sources to the outside, e.g. a commercial distribution grid. In this paper, we propose a battery-based algorithm for the output smoothing control and demonstrate its effectiveness in a practical, residential power system with two homes. In addition to the practical demonstration, by deriving a mathematical model for dynamics of active power flow in the controlled system and analyzing the model numerically and theoretically, we provide a guideline of tuning the feedback gain of the algorithm for a desired control response.

1. はじめに

近年、情報通信技術（ICT）を活用した電力マネジメント技術の研究開発が進められている。従来の電力供給側に相当する技術はスマートグリッドと称され、各国の現状に合わせた研究開発が行われている[1]。一方、電力・エネルギーの有効利用などを目的として、住宅やオフィスなどの電力消費側のマネジメントにも注目が集まっている[1,2]。このような研究開発の例として、住宅内や建物内のエネルギーマネジメントを行う HEMS（Home Energy Management System）や BEMS（Building EMS）が挙げられる[3]。

消費側の電力マネジメント技術において、複数の住宅を対象とした蓄電池マネジメントが検討されている。たとえば、複数の住宅で構成される電力ネットワークの消費電力およびコストの最小化を蓄電機器制御および負荷消費量の調整により行う試み[4]、Cell Grid とよばれる小規模電力システムの有効・無効電力制御による太陽光

発電導入量の最大化と電圧適正化の検討[5]、蓄電機器の効率ならびに送電損失が不確かな電力システムの H^∞ 制御による買電料金の低減[6]などがある。また、参考文献[7]では再生可能エネルギー源の出力不確定性の蓄電池を用いた低減および補償が報告され、参考文献[8]では蓄電池を用いた負荷平準化が報告されている。このように、複数の住宅を対象とすることで、消費側マネジメントの多機能化のみならず、単一の住宅では容量の観点で困難な電力供給側へ貢献する可能性が生まれる。

本論文では、上記の研究背景を踏まえて、複数家庭で構成される電力システムの蓄電池による出力平滑化制御を検討する。ここで「家庭」とは、太陽光発電や蓄電池などの分散電源、負荷、制御システムから成る小規模電力システムを意味し、従来の住宅やオフィスと同等の設備容量を有するシステムモデルである[9,10]。筆者らは参考文献[9,10]において複数家庭の電力マネジメントに関する検討結果を報告してきた。また、上記の「出力平滑化」とは、商用系統などの家庭の外部システムへの出力電力を目標値に追従させるための制御技術を意味する。本技術は、出力が不確定な小規模分散電源を含む家庭と商用系統との調和という観点から重要である。先行研究として、参考文献[11]では、マイクログリッドを対象に本論文と同種の制御目的である需給バランスの確保のた

* 原稿受付 2014年8月27日

[†] 京都大学 大学院工学研究科 電気工学専攻 Department of Electrical Engineering, Kyoto University; Katsura, Nishikyo, Kyoto 615-8510, JAPAN

[‡] 現 オムロン株式会社

Key Words: power system control, battery, output smoothing, distributed energy resource.

めに、 H^∞ 制御を用いて蓄電池およびガスエンジンの制御系を設計している。また、同一の電力システムと制御目的に対して参考文献 [12] では定数ゲイン制御器の設計を Stability Feeler を用いて行っている。本論文では、単一家庭および複数家庭の出力平滑化制御に関するアルゴリズムを新たに提案し、実際の住宅における実証実験により提案アルゴリズムの有効性を示す。つづいて、出力平滑化アルゴリズムを適用した系のダイナミクスの解析を数値的ならびに理論的に行う。具体的には、蓄電池の入出力特性を実測時系列より同定することで、有効電力の時間応答を表す数値モデルを導出する。つぎに、太陽光発電電力および家庭内電力消費をガウス分布に従う時系列とした場合と実測時系列を用いた場合について、提案アルゴリズムのフィードバックゲインと出力電力の平均および分散との関係を検討する。そして、上記平均および分散の検討に加えて、制御された系の安定余裕を検討することにより、出力電力の望ましい時間応答を得るためのゲインの設定指針を与える。なお、本論文の一部は参考文献 [13,14] において報告されていることを付記する。

本論文の構成は以下の通りである。本節に続く 2. では、本論文の実証実験および解析で用いる 2 軒の家庭で構成される電力システムの概要を述べる。3. では、本論文で検討する出力平滑化制御の概念を述べるとともに、蓄電池による出力平滑化アルゴリズムを提案する。4. では、京エコハウス内電力システムへの提案アルゴリズムの実装方法、単一家庭および複数家庭の制御実験結果を詳述する。5. では、提案アルゴリズムを適用した系の解析を行い、フィードバックゲインの設定指針を検討する。最後に 6. で本論文をまとめる。

2. 複数家庭で構成される電力システム

本論文の実証実験および解析は、Fig. 1 に示す京都府京都市左京区「京エコハウス」内の電力システムに対して行ったものである。本節では、京エコハウス内電力システムの基本構成および実験に向けた電力計測の概要を説明する。

Fig. 2 に京エコハウス内電力システムの基本構成を示す。京エコハウスには、ガス発電ユニット（コージェネレーション; CHP）、太陽光発電（PV）パネル、定置型蓄電池などが設置されている。本論文では、対象とする電力システムが 2 軒の家庭および商用系統から構成されているものと見なし、PV パネルおよび負荷で構成されるサブシステムを家庭 1（HOME1）とよび、負荷、定置型蓄電池、およびガス発電ユニットから構成されるサブシステムを家庭 2（HOME2）とよぶ。なお、家庭 1 内の PV パネルに導入されているパワーコンディショナ（PCS）の定格出力は 4kW、家庭 2 内の定置型蓄電池は定格容量 10kWh、最大充放電電力は 4kW である。

つづいて、Fig. 2 のシステムにおける電力の流れを説



Fig. 1 Overall view of Kyo-Eco House with residential power system used for practical demonstration and analysis in this paper

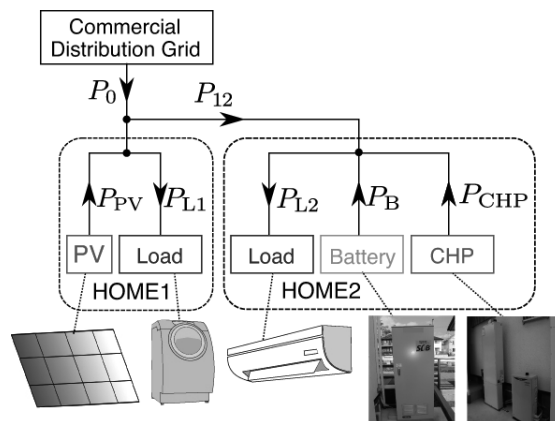


Fig. 2 Schematic diagram of residential power system with two homes in Kyo-Eco House

明する。このために、PV パネルの発電電力、家庭 1 内の負荷消費電力、家庭 2 内の負荷消費電力、ガス発電ユニットの出力電力、蓄電池の出力電力をそれぞれ P_{PV} , P_{L1} , P_{L2} , P_{CHP} , P_B とよび、Fig. 2 の矢印の方向で正の値を取るものとする。 P_B の正の符号は蓄電池の放電動作を表し、負の符号は充電動作を表す。実際のシステムでは、各電力の計測値が 1 秒ごとにセンターサーバに集められ、家庭 2 の出力電力 $-P_{12}$ の計測値も収集される。また、Fig. 2 において電力システムが商用系統へ出力する電力を $-P_0$ とよぶ。なお、本論文では実験対象の制約から P_0 が正となる場合、すなわち商用系統から電力システムへ正の電力が流入する場合を考えるため、Fig. 2 の矢印の方向で P_0 は正の値を取るものとする。なお、 P_0 は $P_0 = P_{L1} + P_{12} - P_{PV}$ の関係式より計測値を用いて算出される。

3. 出力平滑化制御の概念と提案アルゴリズム

本節では、単一家庭および複数家庭で構成される電力システムの蓄電池を用いた出力平滑化制御の概念とその制御に求められる要件を説明し、出力平滑化制御を実現するためのアルゴリズムを提案する。

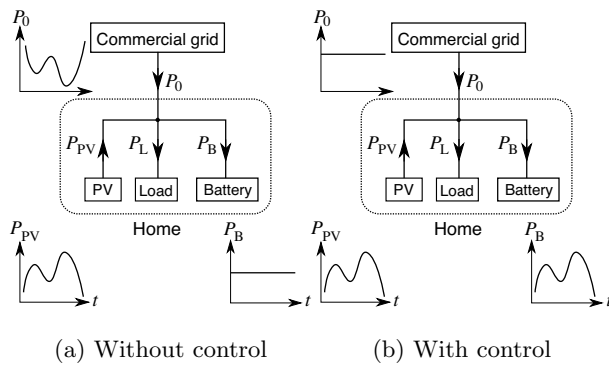


Fig. 3 Outline of battery-based output smoothing control for a single home

3.1 概念

本論文では、出力平滑化制御を「単一および複数家庭の外部システムへの出力電力を与えられた一定目標値に追従させる制御」とする。Fig. 3に蓄電池による単一家庭の出力平滑化制御の概念を示す。図の家庭には分散電源としてPVおよび蓄電池が存在するものとする。PVの出力電力が変動する場合、家庭の外部システムに相当する商用系統への出力電力 $-P_0$ は一般に変動する(Fig. 3(a))。一方、蓄電池の充放電出力を適切に制御できれば、PVの出力変動に関わらず商用系統への出力電力を一定にすることが可能となる(Fig. 3(b))。本論文ではこのような蓄電池による出力平滑化制御を単一家庭および複数家庭に対して検討する。

ここで、単一家庭および複数家庭で構成される電力システムの出力平滑化アルゴリズムに求められる要件として以下の3点が考えられる。

- (i) 簡素
- (ii) 汎用的
- (iii) 単一および複数家庭に適用可能（スケーラブル）

上記の各要件について詳述する。まず(i)について考える。複数住宅を対象とした電力マネジメントでは蓄電池にさまざまな役割が期待される。本論文の出力平滑化のみならず、家庭内主電源や非常時の電源機能などが挙げられる。そのため、蓄電池による出力平滑化はその他の制御と共存する必要がある。制御系同士の相互干渉が調整可能であるように、出力平滑化アルゴリズムは少ないパラメータで簡素であることが望まれる。

つぎに、要件(ii)について考える。各家庭のPV出力電力や負荷消費電力は異なるものであり、各家庭に設置されている機器の定格などのパラメータも異なる。各家庭のこれらの情報を複数家庭のマネジメントに用いることはプライバシー保護や情報秘匿の観点から難しく、各家庭のパラメータを同定し利用することも容易ではない。よって、複数家庭で構成される電力システム全体の詳細な情報をアルゴリズムに用いることは難しく、各家庭の構造やパラメータに依存しない汎用性が出力平滑化アル

ゴリズムに要求される。

最後に、要件(iii)について考える。本論文で扱う電力システムは2軒の家庭で構成されているが、複数家庭で構成される電力システムでは柱上変圧器以下すべての家庭（たとえば、数十軒）を含む場合も想定される。(ii)と同様の理由からさまざまなスケールの電力システムに対して個別にアルゴリズムを構築することは容易ではない。そのため、単一家庭と複数家庭のように電力システムのスケールが異なる場合でも出力平滑化制御を達成するスケーラブルなアルゴリズムが必要とされる。

3.2 提案アルゴリズム

つぎに、前小節の議論に基づいて、蓄電池による出力平滑化アルゴリズムを提案する。本論文では出力フィードバックおよび積分補償に基づくアルゴリズムを採用する。そして、実験系で得られるデータが離散的であることより、制御器は離散時間系として設計する。制御の対象となる電力システムの時点 $t \in \{0\} \cup \mathbf{Z}$ における操作量を $u[t]$ 、出力を $y[t]$ とすると、定数の目標値 r に対して、時点 $t+1$ における操作量 $u[t+1]$ を決定するための出力平滑化アルゴリズムとして以下の式を考える。

$$u[t+1] = u[t] + K(y[t] - r) \quad (1)$$

(1) 式の K はフィードバックゲインを表す。上述の提案アルゴリズムは積分補償に基づくものであり、ステップ状目標値への追従やステップ状外乱の抑制という制御性能が期待できる。また、出力フィードバックを用いることにより制御量すなわち出力電力の情報のみで平滑化が可能となるため、PV出力電力や負荷消費電力を含む電力システムのパラメータ値を必要とせず、前小節(i)および(ii)の要件を満たす。また、商用HEMSの多くで採用されている電力計測値から代数的演算により充放電指令値を決定する方法と異なり、有効電力応答にシステムのダイナミクスが影響を与える場合もフィードバックおよび積分補償に基づく提案アルゴリズムは有効に動作することが期待される。次節では以上の提案アルゴリズムを京エコハウス内電力システムを用いて実験的に検討する。なお、前小節の要件(iii)について、本論文では単一家庭および2軒の家庭で構成される場合について提案アルゴリズムの有効性を調べる。京エコハウスでは3軒以上の場合の実験的検討は難しく、3軒以上の家庭で構成される電力システムに対する要件(iii)の検討は、そのシステム構成も含めて今後の課題として残されている。

4. 実証実験

本節では(1)式の出力平滑化アルゴリズムの有効性を実験的に検討する。まず、京エコハウス内電力システムへの提案アルゴリズムの実装方法について述べ、提案アルゴリズムの適用結果を単一および複数家庭について詳述する。

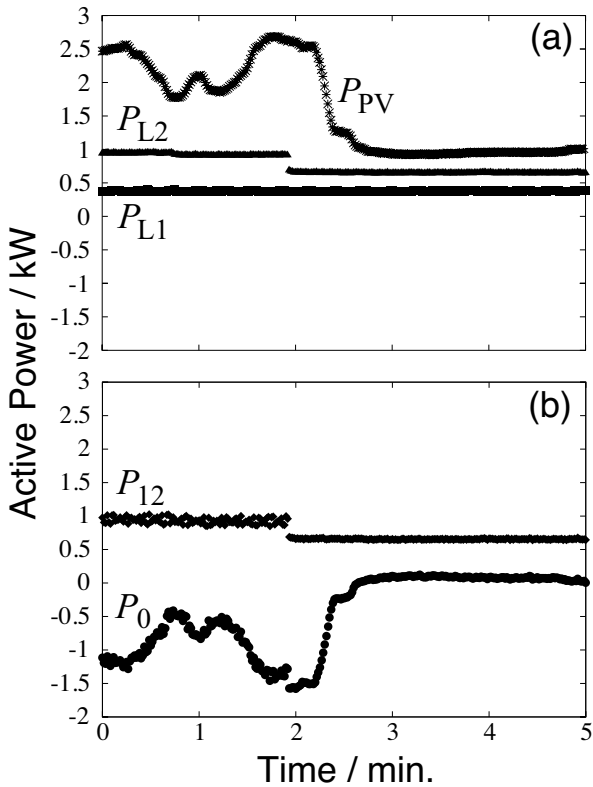


Fig. 4 Example of measured power flows in the residential power system at Kyo-Eco House under no battery control

4.1 提案アルゴリズムの実装

Fig. 2 の京エコハウス内電力システムにおいて、制御対象への操作量は蓄電池の充放電指令値 P_{Bref} である。(1) 式の提案アルゴリズムより、単一家庭の場合の P_{12} または複数 (2 軒) 家庭の場合の P_0 の計測値 $y[t]$ に基づいて蓄電池の充放電指令値 P_{Bref} を以下の通り変化させる。

$$P_{Bref}[t+1] = P_{Bref}[t] + K(y[t] - P_{ref}) \quad (2)$$

なお、 P_{ref} は単一家庭または複数家庭の出力電力指令値である。本研究では上記を蓄電池附属のマネジメントシステムに実装し、1 秒ごとの出力電力の取得データに基づいて蓄電池への指令値を決定した。なお、後述するように P_{12} の測定において検出雑音が重畳する場合が見られたが、本節の実験的検討ではその雑音を除去するためのフィルタは用いていない。

4.2 出力平滑化制御を適用していない場合の計測電力の一例

はじめに、出力平滑化制御を適用していない場合の計測電力の一例を Fig. 4 に示す。なお、この場合に蓄電池の出力電力 P_B はゼロである。また、本論文で報告する実証実験および解析では CHP は動作しておらず、その出力電力はゼロである。図において PV 出力電力 P_{PV} や 2 軒の家庭の負荷消費電力 P_{L1} および P_{L2} が時間的に変

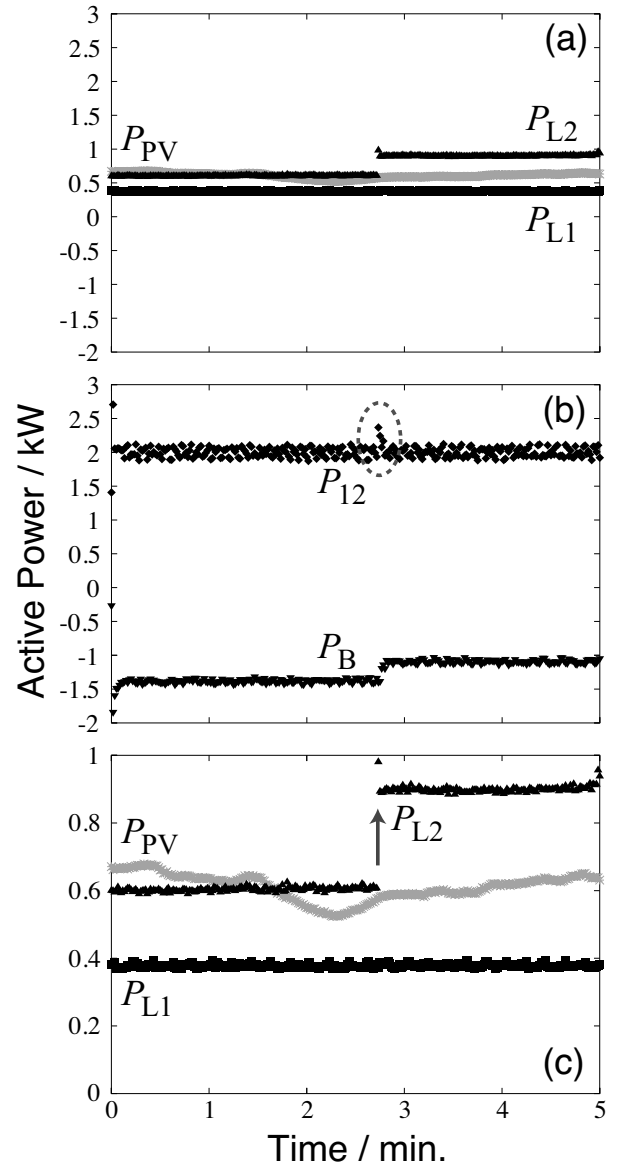


Fig. 5 Short-term experimental result on output smoothing control for the single home at Kyo-Eco House

動しており、その変動が制御量である P_{12} および P_0 に影響を与えている。具体的に見ると、 P_{12} はシステム構成より P_{L2} の影響を受けており、時刻約 2 分において P_{L2} と同様のステップ状変化を示している。また、ステップ状変化の前に P_{12} に見られる微小な変動は検出雑音に起因するものである。なお、その検出雑音に起因する微小変動の大きさは P_{12} 自体の値に比べて小さい。一方、 P_0 は P_{PV} および P_{L2} を介して P_{L2} 両方の影響を受けていることが確認される。

4.3 単一家庭に対する制御実験結果

つづいて、蓄電池を有する家庭 2 を対象として、単一家庭に対する出力平滑化制御の実験結果を述べる。Fig. 5 にフィードバックゲイン $K = 0.75$ 、目標値 $P_{ref} = 2\text{kW}$ に対する 5 分間の制御結果を示す。Fig. 5(c) は (a) の縦

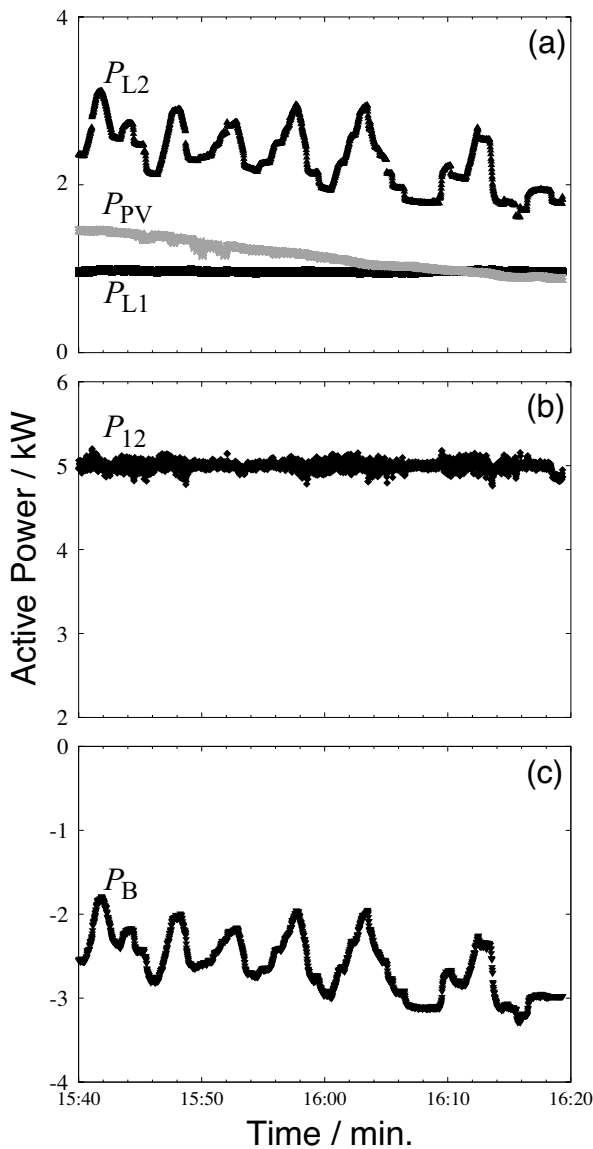


Fig. 6 Long-term experimental result on output smoothing control for the single home at Kyo-Eco House

軸を拡大し時間変動を見やすく示したものである。なお、 K の設定指針については次節で検討する。実際の住宅を用いた実験であることから、Fig. 4 と Fig. 5 では PV 出力電力および家庭 2 の負荷消費電力の変動は異なっている。なお、二つの図において家庭 1 の負荷はほぼ一定の消費電力である。ここで、変動幅に差があるものの PV 出力電力の時間変化に対して、Fig. 5(b) では制御量である P_{12} は目標値近傍で維持されていることがわかる。さらに、Fig. 4 と Fig. 5 において同程度のステップ状変化を示している家庭 2 の負荷消費電力 P_{L2} に対して、Fig. 5(b) では蓄電池出力 P_B が変化することにより、 P_{12} が数ステップの過渡状態を経て目標値に収束していることがわかる (Fig. 5(b) 内の破線の○)。以上より、(1) 式の提案アルゴリズムが単一家庭の出力平滑化に有効であることが実験的に示された。

さらに、Fig. 6 に前述の 5 分間より長い 40 分間の制御

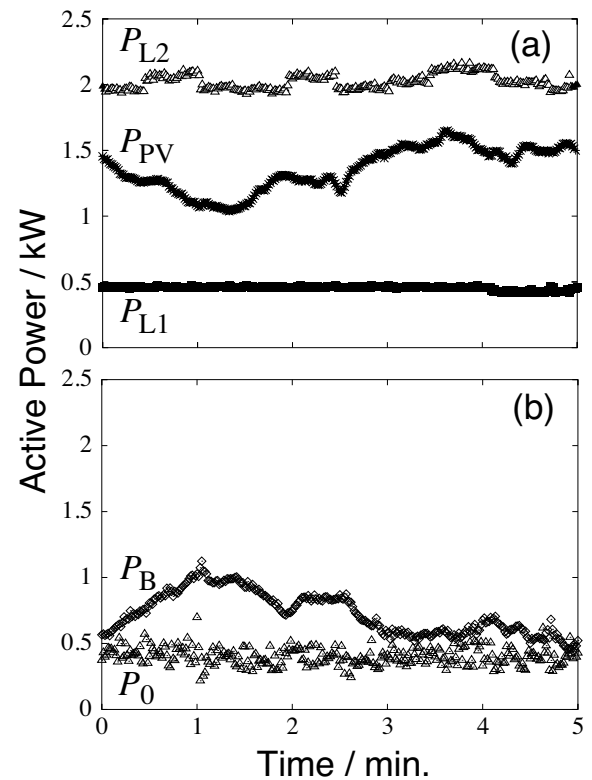


Fig. 7 Experimental result on output smoothing control for coupled two homes at Kyo-Eco House

実験結果を示す。この場合のフィードバックゲイン K は 0.5、目標値 P_{ref} は 5 kW とし、2013 年 4 月 15 日 15 時 40 分から 16 時 20 分に行った結果である。この場合、家庭 2 内の負荷消費電力 P_{L2} が振動的に変化している。しかしながら、出力平滑化制御を適用することにより、制御量 P_{12} の変動は P_{L2} より十分小さく目標値近傍に維持されていると見なされる。なお、Fig. 6(a) および (c) において蓄電池出力 P_B が P_{L2} と類似の時間波形を示しており、蓄電池制御により P_{L2} の変動がうまく相殺されていることを意味している。ただし、提案アルゴリズムでは制御量のみを用いており、外乱に相当する P_{L2} を用いていない。以上から、(1) 式の提案アルゴリズムが負荷消費電力の長期変動のもとでも有効に動作することが実験的に示された。

4.4 複数家庭に対する制御実験結果

つづいて、Fig. 7 に複数家庭に対する提案アルゴリズムの実験結果を示す。本実験では目標値を 0.4 kW、フィードバックゲイン K を 0.5 と設定した。Fig. 7(a) において家庭 2 の負荷消費電力 P_{L2} および PV 出力電力 P_{PV} が大きく変動している。一方、Fig. 7(b) において P_0 が目標値 0.4 kW 前後で変動していることがわかる。この変動は前述と同様に P_{L2} の検出雑音の影響と考えている。また、家庭 1 の負荷消費電力 P_{L1} がほぼ一定であることから、Fig. 7(b) より蓄電池の出力電力波形が $P_{L2} + (-P_{PV})$ に類似しており、PV 出力電力および家庭内消費電力の変

動が蓄電池により相殺されていることを意味している。以上により、本論文で提案した出力平滑化アルゴリズムが複数家庭の場合の P_0 に対しても有効であることが実験的に示された。

5. 出力平滑化制御された系の解析

本節では、前節までに検討した出力平滑化制御を適用した系のダイナミクスを数値的ならびに理論的に解析する。本論文で検討している家庭には出力が不確定な小規模分散電源が存在する。このことを踏まえて、出力平滑化制御の性能を定量的に評価するために、本節では制御量である出力電力の平均および分散に着目する。具体的には、提案アルゴリズムのフィードバックゲインと出力電力の平均および分散との関係を数値的ならびに理論的に検討する。さらに、閉ループ系の安定余裕を検討することにより、フィードバックゲインの設定指針を議論する。なお、本節では複数家庭の出力電力 P_0 についてのみ議論するが、単一家庭 (P_{12}) についても同様の議論が成立することを付記する。

5.1 数値モデルの導出

はじめに、Fig. 2 における P_0 の時間応答を表す数値モデルを導出する。Fig. 2 の電力システムに生起する電氣的過渡現象は Fig. 7(b) の時間変動と比較して十分速く、 P_0 の時間応答は制御器を含めた蓄電池の応答特性で表現可能と考えられる。ここで、京エコハウスの実験系では 1 秒ごとに離散的に電力を計測していることから、パルス伝達関数 [15] $P(z^{-1})$ を用いて蓄電池の応答特性を表す。具体的には、 $P_{L1} + P_{L2} - P_{PV}$ という時系列を P_0 への外乱信号とみなすことで、 $P(z^{-1})$ の出力と $P_{L1} + P_{L2} - P_{PV}$ を加算したものが P_0 となる¹。以上より、 P_0 の時間応答は Fig. 8 のブロック線図で表される。ここで、(2) 式の制御器はデジタル型積分要素であり、その応答特性は次式で表される。

$$C(z^{-1}) = \frac{Kz^{-1}}{1-z^{-1}} \quad (3)$$

また、蓄電池の応答特性は実証実験で得られた入出力データより同定する。ARX モデル [16] に基づく同定を行うことにより、蓄電池の応答特性として以下のパルス伝達関数が得られた。

$$P(z^{-1}) = \frac{0.5708}{1-0.43z^{-1}} \quad (4)$$

以上のパルス伝達関数は、実証実験と数値シミュレーションの時系列データの相関を計算した際に最も大きな相関値が得られたものであり、蓄電池の応答が 1 次遅れ要素として表現されることを示している。

¹単一家庭に対しては外乱信号を P_{L2} のみと考えればよい。

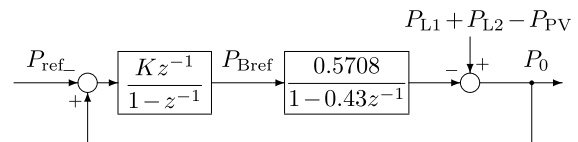


Fig. 8 Block diagram for discrete-time dynamics of output power P_0 in Kyo-Eco House

5.2 出力電力の平均および分散

5.2.1 数値的検討

つづいて、5.1 で導出した数値モデルを用いて複数家庭に対する出力平滑化の数値的検討を行う。本検討では、 P_0 の平均および分散のフィードバックゲイン K に対する依存性を調べる。家庭内の負荷消費電力 P_{L1} および P_{L2} 、PV 出力電力 P_{PV} の時系列がガウス分布に従う場合と実測データを用いた場合についてそれぞれ検討する。なお、本節の検討で用いる K に対して閉ループ系の安定性は保証されているものとし、安定性については 5.3 で検討を加える。

ここで、本小節で用いる数値シミュレーションの設定をまとめておく。 P_0 の目標値は 0.4 kW で一定とし、ゲイン K の値を 0 から 1 まで 0.01 刻みで設定し、各 K の値に対して P_0 の平均および分散を算出した。なお、時系列のサンプル数は 1000 で固定とし、平均および分散の算出には制御開始 50 秒後以降の時系列データを用いた。

まず、PV 出力電力ならびに負荷消費電力の時系列がガウス分布に従う場合について、複数家庭の出力平滑化制御の数値シミュレーション結果を述べる。家庭の負荷 P_{L1} および P_{L2} のガウス分布として、 P_{L1} は平均 0.5 および分散 3×10^{-5} 、 P_{L2} には平均 0.9 および分散 3×10^{-5} を仮定する。また、 P_{PV} には平均 1.5 および分散 1.0×10^{-4} のガウス分布と仮定する。なお、数値シミュレーションに用いるガウス時系列には白色性を仮定する。上記設定は、京エコハウスで確認された逆潮流 (P_0 が負) を再現することを意図したものであり、このために PV 出力発電の平均を負荷消費電力の平均の和より大きく設定している。さらに、 P_{L1} と P_{L2} 、 P_{PV} は無相関であると仮定する。本仮定は京エコハウスの実証実験において成立していたものである。以上より、閉ループ系への外乱とみなす $P_{L2} + P_{L1} - P_{PV}$ の時系列は各平均と分散を足し合わせたガウス分布に従うことになる。

Fig. 9 にゲイン K に対する P_0 の平均および分散の依存性を示す。 K が 0.1 より小さい領域では、平均は目標値である 0.4 kW より離れた値を取り、分散は単調減少する。これは、平均および分散の算出のために設定したサンプル数 (1000) までに閉ループ系が定常状態に収束しないことに起因している (上記設定よりサンプル数を十分大きく取ると、平均および分散は K が 0.2 より大きい領域と類似の特性を示す)。一方、 K が 0.1 より大きい領域では、平均は目標値 0.4 kW と一致し、分散は K

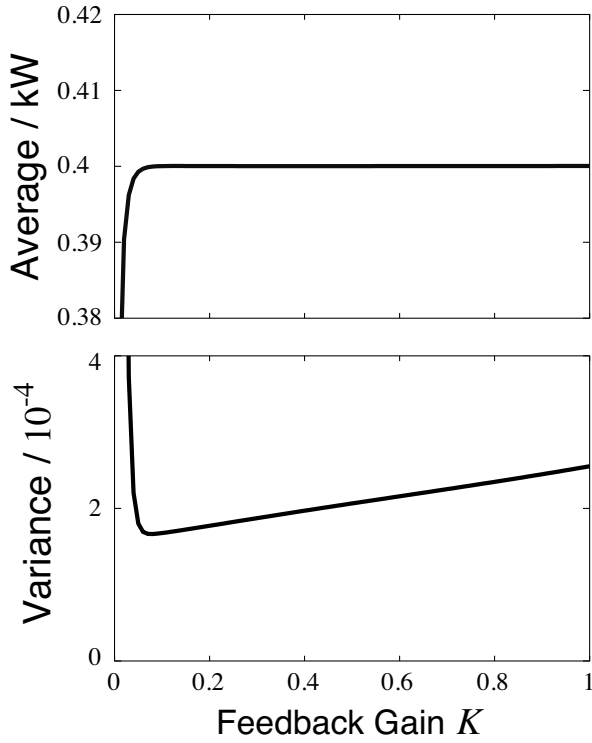


Fig. 9 Gain dependence of average and variance in output power for coupled two homes under Gaussian disturbance

に対して単調増加する。これらの特性については 5.2.2 で理論的に検証する。

つづいて、PV 出力電力ならびに負荷消費電力の時系列に京エコハウスで得られたデータを用いた場合の数値シミュレーション結果を示す。本検討では、上記時系列として 2013 年 4 月 6 日 11 時 26 分 46 秒から 11 時 43 分 36 秒に得られたデータを用いた。Fig. 10 に実測時系列を示す。負荷 P_{L1} の時系列の平均は 0.478, 分散は 2.6×10^{-5} であり, P_{L2} の平均は 0.313, 分散は 1.0×10^{-5} であった。また, PV 出力電力 P_{PV} について緩やかな時間変化成分を除いた時系列の分散を計算すると 3.3×10^{-5} であった。Fig. 11(a) にゲイン K を 0.75 とした場合の P_0 の数値シミュレーション結果を示す。 P_0 が目標値 0.4 kW を中心に変動している。Fig. 11(b) にゲイン K と P_0 の平均および分散との関係を示す。Fig. 9 と Fig. 11(b) との比較より、分散については K の大きい領域で差異が見られるものの、平均および分散の特性はガウス時系列と実測時系列を用いた場合で類似していることが確かめられる。このことを踏まえて、次小節以降では所望の平均および分散を得るためのゲイン K の設定指針をガウス時系列に基づいて理論的に検討する。

5.2.2 理論的検討

つづいて、5.1 で導出した数理モデルの理論的検討を行う。まず、前小節で示したガウス時系列の場合の数値シミュレーション結果を理論的に検証する。さらに、閉ループ系の定常状態の考察により、フィードバックゲイ

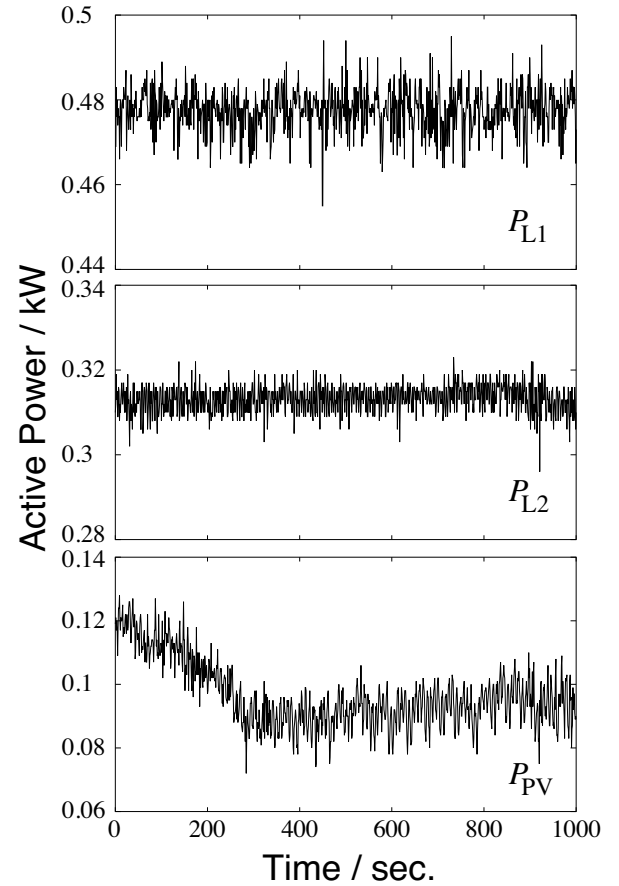


Fig. 10 Measured time series of load consumptions and PV generation used in simulation

ン K と P_0 の平均および分散との関係を理論的に考察する。

はじめに、 P_0 の平均を検討する。Fig. 8 より閉ループ系のダイナミクスを表す以下の離散時間状態方程式を得る。

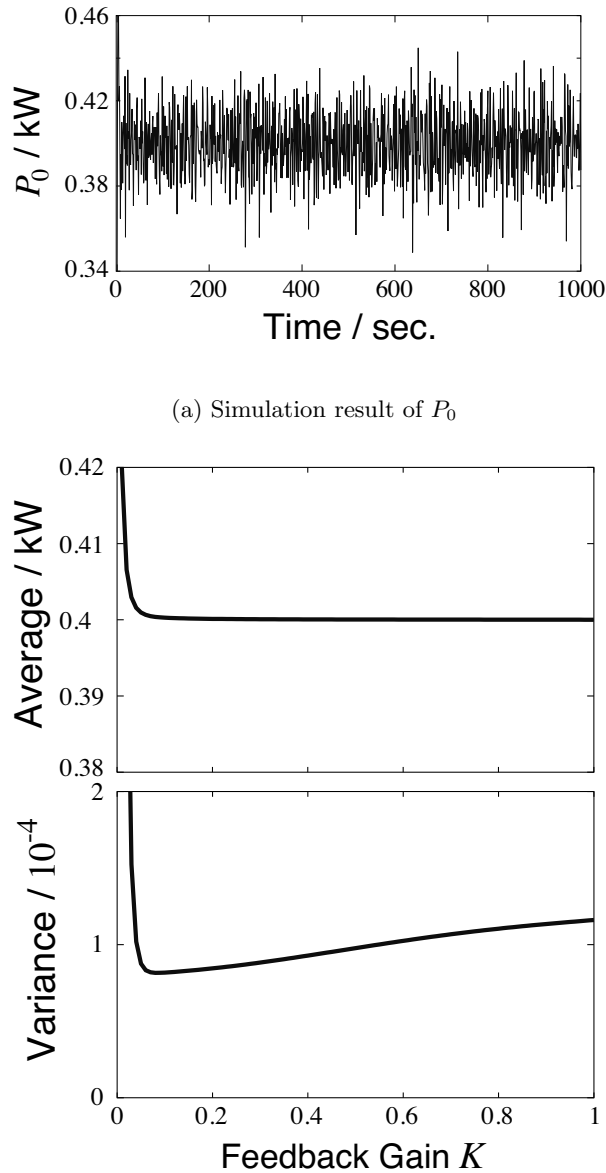
$$\left. \begin{aligned} x[t+1] &= Ax[t] + Br + Bd d[t] \\ y[t] &= Cx[t] + d[t] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 r は一定の目標値、 $d[t]$ は外乱信号であり、複数家庭の出力平滑化に対して $P_{L1} + P_{L2} - P_{PV}$ に対応する。(5) 式中の係数行列は以下で与えられる。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a & b \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 & c \end{bmatrix} \quad (6)$$

なお、 $a = -0.43$, $b = 1.43 - 0.5708K$, $c = 0.5708K$ である。(5) 式で $d[t]$ の時間平均が有限で一定である場合、本小節の範囲では A が（離散時間の意味で）安定行列であることから、出力 y の平均は一定値に収束する。(5) 式を解くことにより、明らかに出力 y の平均は目標値 r と等しくなる。以上より、 P_0 の平均が目標値に収束する前小節の数値シミュレーション結果が裏付けられた。

つぎに、外乱の分散 σ_d^2 と出力の分散 σ^2 との関係を調べる。(5) 式に対して、 $x[t+1]$ の共分散行列 $\Sigma_x[t+1]$

(b) Gain dependence of average and variance in P_0 Fig. 11 Simulation of output active power P_0 for coupled two homes exposed to measured time series of load consumptions and PV generation

および出力 $y[t]$ の共分散行列 $\Sigma_y[t]$ は以下の差分方程式で表される [17].

$$\left. \begin{aligned} \Sigma_x[t+1] &= A\Sigma_x[t]A^\top + B_d\Sigma_d[t]B_d^\top \\ \Sigma_y[t] &= C\Sigma_x[t]C^\top + \Sigma_d[t] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここで、 $\top$ は行列の転置操作を表し、 $\Sigma_d[t]$ は時点 t における外乱の共分散行列である。上述のように A が安定行列であることから、共分散行列 $\Sigma_x[t]$ および $\Sigma_y[t]$ は極限を有する [17]。この極限における行列をそれぞれ $\Sigma_{x\infty}$, $\Sigma_{y\infty}$ で表すと、(7) 式より以下が得られる。

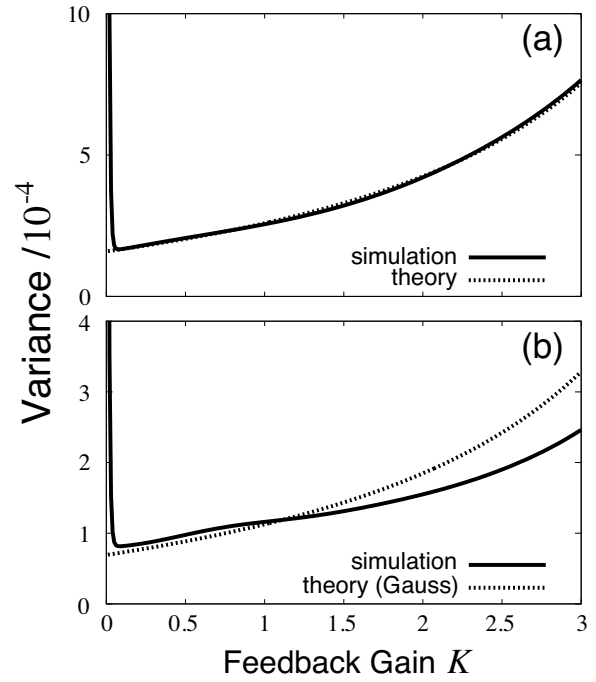


Fig. 12 Theoretical evaluation of gain dependence of variance in output power for coupled two homes: (a) Gaussian disturbances and (b) measured time series

$$\left. \begin{aligned} \Sigma_{x\infty} &= A\Sigma_{x\infty}A^\top + B_d\Sigma_{d\infty}B_d^\top \\ \Sigma_{y\infty} &= C\Sigma_{x\infty}C^\top + \Sigma_{d\infty} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

対象のシステムがスカラーの外乱信号およびスカラーの出力信号を有することから、 $\Sigma_{d\infty} = \sigma_d^2$ および $\Sigma_{y\infty} = \sigma^2$ に対して (8) 式を解くことにより、外乱の分散 σ_d^2 と出力の分散 σ^2 に関する以下の式が得られる。

$$\sigma^2 = \left[1 + \frac{c^2}{1 - a^2 - (1+a)b^2/(1-a)} \right] \sigma_d^2 \quad (9)$$

ここで a , b , c は係数行列の成分であり、(6) 式の直下に与えられている。(9) 式より、ゲイン K にかかわらず σ_d^2 の係数が 1 以上となるため、出力の分散は外乱の分散より大きくなることがわかる。この理由は以下の通りである。Fig. 8 より外乱が制御対象の出力端に加えられていることから、制御量 (P_0) は制御対象の出力 (蓄電池の充放電電力) と外乱の和になる。ここで外乱信号である P_{L1} , P_{L2} および P_{PV} をガウス分布に従う時系列とした。Fig. 8 は線形システムであるため時系列の分布は保存されるため、蓄電池の充放電電力はガウス分布に従う時系列となり、その分散は非零 (正) となる。ガウス時系列同士の和の分散はそれぞれの時系列の分散の和になり、出力の分散は外乱の分散より必ず大きくなる。

Fig. 12 に PV 出力電力ならびに負荷消費電力の時系列がガウス分布に従う場合および実測時系列の場合の分散の数値シミュレーション結果と理論式 (9) との比較を示す。ここでは (9) 式の σ_d^2 を分散の和である 1.6×10^{-4}

とした。Fig. 12(a) より、ガウス時系列の場合はシミュレーション結果と理論式 (9) がほぼ一致していることが確認できる。

さらに、Fig. 12(b) に (9) 式で計算した結果と実測時系列の場合の結果である Fig. 11(b) との比較を示す。(9) 式において σ_d^2 は Fig. 10 の分散の和である 6.9×10^{-5} とした。Fig. 12 より、ガウス分布の場合と実測時系列の場合ではゲイン K に対する依存性が異なっている。(9) 式より、ガウス時系列の場合の分散は外乱の分散にシステムの係数より決定される定数を掛けたものとなる。すなわち、分散の変化はシステムのみ依存する。これは外乱として用いたガウス時系列に白色性を仮定していたことに起因する。一方、実測時系列の周波数スペクトルは平坦ではなく白色性を有しない（付録の図を参照）。以上から、外乱の周波数スペクトルが出力の分散に影響を与え、Fig. 12 のような分散に関する特性の差異が生じたと考えられる。

以上の数値的および理論的検討より、出力電力の平均を目標値に一致させ、かつ出力電力の分散を小さく抑えるためには、過渡状態が長くない範囲でゲイン K を小さく設定することが望ましい。

5.3 安定余裕

最後に、Fig. 8 で表される閉ループ系の安定余裕を検討する。Fig. 8 より一巡パルス伝達関数 $G_0(z)$ は次式で与えられる。

$$G_0(z) = \frac{0.5708Kz}{z^2 - 1.43z + 0.43} \quad (10)$$

上式に $z = e^{j\omega T} = \cos(\omega T) + j\sin(\omega T)$ (j は虚数単位) を代入することにより、一巡パルス伝達関数 $G_0(z)$ のナイキスト軌跡を求めることができる。ここで、 $\omega T = 2\pi fT$ であり、 T はサンプリング周期、 f ($0 \leq f \leq 1/(2T)$) は周波数である。本小節では、京エコハウスでの電力計測が1秒間隔であることから $T = 1\text{s}$ とし、 K を0から5.5の範囲でナイキスト軌跡を描きゲイン余裕および位相余裕を求めた。

Fig. 13 に (a) ゲイン余裕および (b) 位相余裕の数値計算結果を示す。Fig. 13(a) の破線は 0 dB を表しており、これを下回ると閉ループ系は不安定である。計算結果より K の増加に伴いゲイン余裕および位相余裕ともに減少していることが確認できる。そして、 K が5を超えるとゲイン余裕および位相余裕がそれぞれ0以下となり、閉ループ系は不安定となる。

Fig. 8 で用いた数理モデルは時系列データに基づくシステム同定で得られたモデルであるため、モデル化誤差の影響を考慮することは重要である。本数値シミュレーションより、パラメータ K の増加に伴いゲイン余裕および位相余裕ともに減少する。これは K を大きく設定した場合、モデル化誤差が閉ループ系の安定性に与える可能性を示している。以上より、閉ループ系の安定性

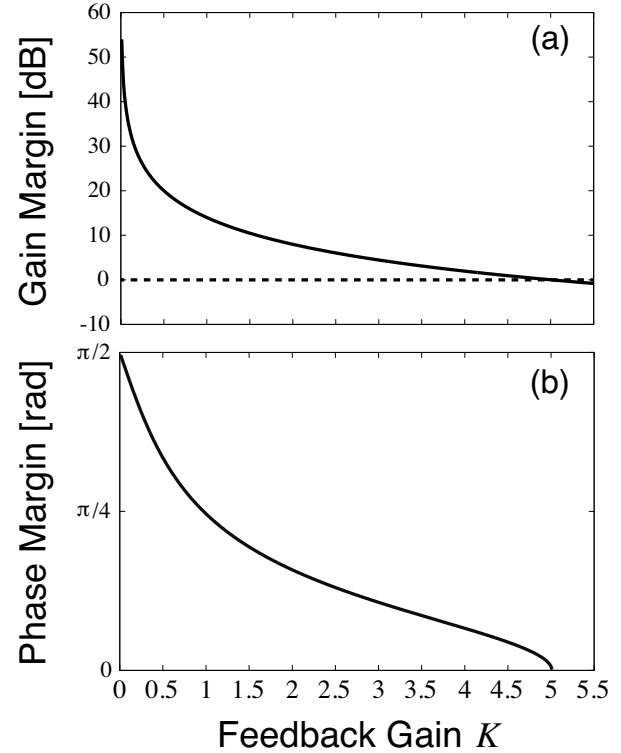


Fig. 13 Gain dependence of gain and phase margins in the closed-loop system

の確保という観点からゲインおよび位相余裕を大きく設定する必要がある、この場合も K を小さく設定することが望ましい。

6. おわりに

本論文では、複数家庭で構成される電力システムの出力平滑化制御を検討した。出力フィードバックおよび積分補償に基づく出力平滑化のアルゴリズムを新たに提案し、京エコハウスを用いた実証実験により提案アルゴリズムの有効性を示した。さらに、実測時系列から同定された数理モデルの数値的ならびに理論的検討により、出力平滑化制御に関するフィードバックゲイン K の設定指針を検討した。本論文で得られた設定指針は下記の通り要約される。

- 閉ループ系の安定性を保証し、出力電力の平均を目標値に一致させ、かつ出力電力の分散を小さく抑えるためには、過渡状態が長くない範囲でゲイン K を小さく設定する。

なお、実測時系列を用いた場合も同様のゲイン依存性を得ていることから、本指針はガウス時系列と異なる実際の場合においても有効であると考えられる。以上で検討した制御アルゴリズムは積分補償の基本的な構造をもつものである。本論文で得られた知見は、そのような基本的な構造の制御アルゴリズムが複数住宅の電力マネジメントに有効であることを実証実験、数値的ならびに理論的に示したことにあ

最後に、本論文から派生する課題を整理する。本論文で提案したアルゴリズムでは出力電力の分散を外乱の分散より小さくすることは原理上不可能である。これを克服するためには、住宅内で測定可能である外乱をフィードフォワード要素を介して蓄電池制御に活用することなどが考えられる。また 3.2 で述べたように、本提案アルゴリズムのスケラビリティを検討することも今後の課題である。これに関連し、蓄電池を 2 棟以上備えたシステムに対して、どのレベルの出力をどの蓄電池で担うかについてなど、蓄電池マネジメントシステムの協調などの課題も検討する必要がある。

謝 辞

本研究の一部は、情報通信研究機構による委託研究「情報通信・エネルギー統合技術の研究開発」の助成を受けたものです。星野寛氏(株式会社オクトパス)をはじめ関係者各位に謝意を表します。また、有益なご助言をいただいた査読者各位に感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] 特集 エネルギーシステムの新展開—ICT による消費情報の収集と利用; システム/制御/情報, Vol. 55, No. 6, pp. 215–255 (2011)
- [2] 特集 エネルギーの情報化; 情報処理, Vol. 51, No. 8, pp. 966–971 (2010)
- [3] 特集 本格化する HEMS/BEMS 技術; 技術総合誌 OHM, Vol. 98, No. 11, pp. 16–33 (2011)
- [4] Y. Guo, M. Pan, Y. Fang and P. P. Khargonekar: Coordinated energy scheduling for residential households in smart grid; *Proc. 2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications*, pp. 121–126 (2012)
- [5] 高山, 石亀: 配電システムにおける Cell Grid の自律分散制御に関する研究報告; 第 55 回自動制御連合講演会予稿集, pp. 1536–1538 (2012)
- [6] W. -Y. Chiu, H. Sun and H. V. Poor: Demand-side energy storage system management in smart grid; *Proc. 2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications*, pp. 73–78 (2012)
- [7] 奥田, 木村: 太陽光発電システムの出力変動抑制技術; 東芝レビュー, Vol. 65, No. 9, pp. 10–14 (2010)
- [8] 沼田, 森野, 猪腰: 建物の電力負荷変動計測と分散型電源による負荷追従制御: 蓄電池によるピークカット試運転; 日本建築学会大会学術講演梗概集. D-2, pp. 1357–1358 (2004)
- [9] Y. Susuki, R. Kazaoka and T. Hikiyara: Physical architecture and model-based evaluation of electric power system with multiple homes; *IEICE Transaction on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, Vol. E96-A, No. 8, pp. 1703–1711 (2013)
- [10] 薄, 櫛田, 引原: 複数家庭で構成される電力システムのデザイン (3): 蓄電機器のマネージメント; 第 56 回システム制御情報学会研究発表講演会論文集, pp. 319–320 (2012)
- [11] 宮崎, 工藤, 永原, 林, 山本: エネルギーマネジメントシステムにおける電力需給バランス制御; *Panasonic Technical Journal*, Vol. 57, No. 4, pp. 17–22 (2012)
- [12] 林, 松田, 谷内: Stability Feeler を利用したマイクログリッドの制御法; 計測自動制御学会第 13 回制御部門大会予稿集 (2013)
- [13] 山口, 薄, 引原: 複数家庭で構成される電力システムの定置型蓄電池による出力平滑化制御に関する検討; 信学技報, CAS2013-38/NLP2013-50, Vol. 113, No. 224, pp. 13–18 (2013)
- [14] Y. Yamaguchi, Y. Susuki and T. Hikiyara: A practical demonstration of battery control for electric-power management of multiple homes; *Proc. 2014 ISICE/ASME International Symposium on Flexible Automation (ISFA2014)* (2014)
- [15] 荒木 (システム制御情報学会 (編)): デジタル制御理論入門, pp. 40–43, システム制御情報ライブラリー 4, 朝倉書店 (1991)
- [16] 足立: システム同定の基礎, 東京電機大学出版局, pp. 98–99 (2009)
- [17] K. J. Åström: *Introduction to Stochastic Control Theory*, pp. 48–49, Dover Publication (2006)

付 録

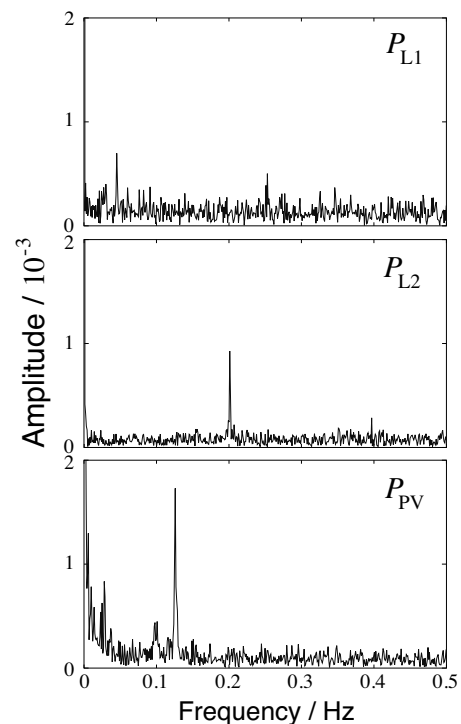


Fig. A1 Frequency spectrum of measured time series in load consumptions P_{L1} and P_{L2} , and PV output power P_{PV} . The time series are shown in Fig. 10. Note that the slowly variable component in the original data was removed for spectrum computation of P_{PV}

Fig. A1 に 5.2.1 で用いた実測時系列の周波数スペクトルを示す。なお、PV 出力電力では時間的に緩やかな時間変化を除いた時系列に対する周波数スペクトルの計算結果である。これらの図から周波数スペクトルが平坦ではなく、本論文での理論的検討において仮定した白色性を実測時系列が有していないことがわかる。

著者略歴

やまぐち よしひこ
山口 佳彦 (正会員)



2012 年 4 月京都大学大学院工学研究科修士課程入学，2014 年 3 月京都大学大学院工学研究科修士課程修了。現在オムロン株式会社勤務。在学中は複数家庭の電力マネジメントの研究に従事。

すすき よしひこ
薄 良彦 (正会員)



2005 年 3 月京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年 4 月同大学院助手，2011 年 10 月同講師となり，現在に至る。その間，2008 年 4 月～2010 年 3 月米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校客員研究員。応用非線形ダイナミクス，電力・エネルギーシステム，制御応用の研究に従事。京都大学（博士）。2009，2015 年度システム制御情報学会・学会賞論文賞，2012 年度エヌエフ基金・研究開発奨励賞などを受賞。計測自動制御学会，電子情報通信学会，電気学会，IEEE，SIAM などの各会員。

ひきはら たかし
引原 隆士 (正会員)



1987 年 3 月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程研究指導認定退学。関西大学を経て，1997 年 4 月京都大学助教授，2001 年 8 月同教授となり，現在に至る。その間，1993 年 3 月～1994 年 3 月米国コーネル大学客員研究員。パワーエレクトロニクス，非線形力学の工学的応用，MEMS の研究，情報通信・エネルギー統合技術の研究開発などに従事。京都大学工学博士。電子情報通信学会（フェロー），電気学会，APS，SIAM，IEEE，AIAA などの各会員。