



## 家庭内電力システムの出力量平準化のためのモードスイッチング制御：実機実験と性能評価

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-02-02 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 齋藤, 司, 薄, 良彦, 引原, 隆士 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10466/15725">http://hdl.handle.net/10466/15725</a>

# 家庭内電力システムの出力平準化のためのモードスイッチング制御： 実機実験と性能評価

齋藤 司<sup>†a)</sup> 薄 良彦<sup>††b)</sup> 引原 隆士<sup>†c)</sup>

Mode Switching Control for Output Levelling of In-Home Electric Power System:  
Experiment and Performance Evaluation

Tsukasa SAITO<sup>†a)</sup>, Yoshihiko SUSUKI<sup>††b)</sup>, and Takashi HIKIHARA<sup>†c)</sup>

あらまし 本論文では、家庭内電力システムの出力電力平準化を制御目的として、電力システムを構成する機器の動作モードを決定するモードスイッチング制御器を設計する。ここで、各機器に要求する動作仕様を形式検証で用いられる線形時相論理で記述し、スイッチング制御器の設計へ反映させることにより、機器が要求どおりに動作することを論理的に保証したモードスイッチング制御器を設計する。そして、設計したモードスイッチング制御器を実機シミュレータに実装し、制御器を含む家庭内電力システムの動作を実験的に検討するとともに、数式モデルを用いて数値的に検討する。以上の検討により、モードスイッチング制御器が要求どおりに設計されていること、並びにその制御が出力電力平準化に有効であることを示す。

キーワード 家庭内電力システム、出力平準化、線形時相論理、モードスイッチング

## 1. ま え が き

本論文は、モードスイッチング制御による家庭内電力システムの出力電力平準化を検討する。近年、太陽光発電 (PV) に代表される分散型電源の出力変動抑制への蓄電池の適用が報告されている [1], [2]。このような出力変動抑制は、一部の太陽光及び風力発電設備に対し義務付けられており [3], [4]、分散型電源を有するシステムが電力系統との調和を達成するために必要な技術である。本論文では、家庭内電力システムとして図 1 の構成を考える。このシステムは PV、蓄電系、電気自動車、及び負荷を含み、1 軒の戸建住宅を模擬する。住宅では、前述の PV の出力変動に加えて、電

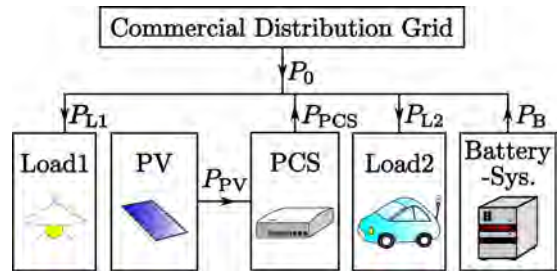


図 1 本論文で対象とする家庭内電力システムの構成  
Fig. 1 Diagram of in-home power system which we consider in this paper.

力消費の不確定な変動が商用系統への出力に直接影響を与える。本論文では、このような電力システムを取り巻く物理的環境の変化のもとで出力変動抑制を実現するために、家庭内に存在する制御可能な電力機器を組み合わせて制御に用いることを検討する。

本論文で提案する制御システムは、居住者 (人間) に直接関わるエネルギーシステムの制御・意思決定を対象とする。このようなシステムは、構成機器並びにシステム自体の誤動作は許容されず、Safety-Critical System [5] と呼ばれる。これまでに Safety-Critical

<sup>†</sup> 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻, 京都市  
Department of Electrical Engineering, Kyoto University,  
Katsura, Nishikyō, Kyoto-shi, 615-8510 Japan

<sup>††</sup> 大阪府立大学大学院工学研究科電気・情報系専攻電気情報システム  
工学分野, 堺市

Department of Electrical and Information Systems, Osaka  
Prefecture University, 1-1 Gakuencho, Nakaku, Sakai-shi,  
599-8531 Japan

a) E-mail: t-saito@dove.kuee.kyoto-u.ac.jp

b) E-mail: susuki@eis.osakafu-u.ac.jp

c) E-mail: hikihara.takashi.2n@kyoto-u.ac.jp

System は、Cyber-Physical System (CPS) [6] と呼ばれる物理系と情報系が相互結合したシステムのモデルにより検討されてきた [7]。CPS に関して、任意の入力に対してシステムが要求どおりの動作を行うことを数学的に証明する「形式検証」という方法が知られている [8]。本方法では、システムの動作の「正しさ」を「仕様」として形式的に記述する。特に、仕様を時相論理式 [9] により記述し、システムの動作がその仕様を満たしているか検証する方法は「モデル検査」と呼ばれる [10]。

最近、上述のモデル検査の方法を EMS に適用した研究が報告されている。文献 [11] では、配電網用遮断器の制御アルゴリズム及び負荷接続の制御アルゴリズムに対してモデル検査を適用している。電力制御システムが正しく動作する条件を仕様として明示的に記述し、モデル検査を用いて上記条件を電力制御システムが満たしていることを論理的に示している。文献 [12]~[14] では、Safety-Critical System である航空機内電力システムに対して時相論理を用いた制御器の設計を行っている。航空機を取り巻く環境の変化を前提として、電力供給の信頼性確保を目的とした制御器の仕様を記述し、その仕様から生成されたオートマトンを制御則として用いることを提案している。これにより、重要な負荷への電力供給を継続することを論理的に保証し、電力供給の信頼性を確保することに成功している。

本論文の内容は、上述の形式検証・モデル検査の方法論を用いて、家庭内電力システムの出力平準化を実現するモードスイッチング制御器を設計し、設計した制御器の動作を実験的並びに数値的に検討したものである。まず、出力電力平準化を実現する制御器の設計を文献 [12]~[14] 並びに [15] に基づき行う。具体的には、制御対象である家庭内電力システムを構成する各機器の制御方策を制御モードとして記述し、制御対象を取り巻く環境の変化に応じて制御モードを切り替えるルール「モードスイッチング制御器」を設計する。続いて、設計した制御器を含む家庭内電力システムの動作検証を、実機シミュレータ並びに数式モデルを用いて行う。この両者により、設計したモードスイッチング制御器が家庭内電力システムの出力平準化に有効であることを示すとともに、その性能が文献 [15] で示された出力平準化制御の性能と比較して平均 2 乗誤差 (目標値まわりの二次のモーメント [16] と定義する) のオーダの観点で同等であることを示す。なお、本論

文の一部は文献 [17], [18] 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、以下のとおりである。2. では、本論文の対象である家庭内電力システム及びそれを模擬した実機シミュレータの詳細を説明する。3. では、文献 [12]~[15] をもとに出力平準化に対するモードスイッチング制御器の設計を行う。4. では、モードスイッチング制御器を実機シミュレータに実装し、PV 及び負荷の実測時系列データを使用した出力平準化の実験結果を説明する。5. では、システム同定の手法を用いて、家庭内電力システムの有効電力に関する動特性モデルを構築した上で、4. と同様の時系列データを用いた出力平準化の数値シミュレーションを行う。6. では、本論文をまとめ、今後の課題を述べる。

## 2. 家庭内電力システムの構成と実機シミュレータ

最初に、本論文の制御対象である家庭内電力システムについて説明する。家庭内電力システムは 1 軒の戸建住宅を想定したものである。以下では、システムの構成について述べるとともに、家庭内電力機器の動作について説明する。更に、上述のシステムを模擬した実機シミュレータについて詳述する。

### 2.1 家庭内電力システムの構成

家庭内電力システムの概略図を図 1 に示す。太陽光発電アレー PV 及び家庭内の負荷 Load1 は家庭を取り巻く物理的・人的環境により出力あるいは発電量 (負荷の場合は入力あるいは消費量) が変化する機器であり、その積極的な制御は通常想定されていない。一方、蓄電系 Battery-Sys., パワーコンディショナ PCS 及び電気自動車を実定した負荷 Load2 は、出力 (負荷の場合は入力) の制御を想定した電力機器である。ここで、蓄電系の出力電力  $P_B$  は  $-P_{Bmax}$  から  $P_{Bmax}$  までの値を任意に取ることが可能であり、PCS は PV の出力電力に制限値を設定することが可能とする。この PCS の機能は分散型電源の出力制御機能 [19] に相当するものである。Load2 は 0kW または一定消費  $P_{L2ref}$  のどちらかを取るものとする。これは、電気自動車の充放電を想定したものである。このような構成の電力システムに対して、本論文の制御目的は、商用システムに対する家庭内電力システムの出力電力  $P_0$  (商用システムから家庭内電力システムへ正の有効電力を供給する方向を正とする) を一定目標値  $P_{0ref}$  に近づけることである。

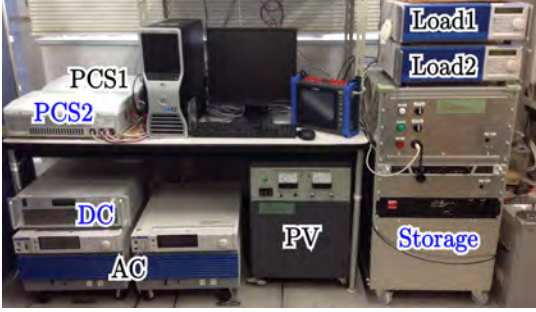


図 2 家庭内電力システムの実機シミュレータ

Fig. 2 Photograph of hardware simulator for in-home power system.

## 2.2 実機シミュレータ

図 1 の家庭内電力システムを実機により模擬した実機シミュレータを説明する．実機シミュレータの外観を図 2 に示し，シミュレータを構成する各機器について，図 2 上の名称に合わせて以下に説明する．

- AC: 交流電源 (KIKUSUI, PCR1000LE) 2 台であり，単相三線式 200 V 系統を模擬する．
- PV: 定格 2kW の直流電源 (TAKASAGO, GP0250-20R) であり，太陽光発電アレーを模擬する．本電源は PCS1 へ電力を供給する．
- DC: 定格 1.35kW の直流電源 (MATSUSADA, SCS1k) であり，PCS2 へ電力を供給する．
- PCS1, PCS2: PV 連系用パワーコンディショナ (オムロン製) である．
- Storage: 定格 1kWh の定置型蓄電池 (CAP-TEX 製) である．本機器を商用系統へ連系している場合，充電若しくは停止動作が任意に選択可能である．充電電力は 1.34kW で一定である．
- Load1, Load2: 電子負荷 (KIKUSUI, PCZ10-00A) であり，家庭内負荷及び電気自動車 (充電のみ) を模擬する．

また，上記機器のシミュレータにおける入出力関係を図 3 に示す．図 2 及び図 3 の AC, Load1 及び Load2 は図 1 の同名の機器に対応する．PV 及び PCS1 は図 1 の PV 及び PCS に対応する．一方，図 3 の三つの機器 DC, PCS2 及び Storage を合わせた系の出力が図 1 の蓄電系に対応する．これは，Storage による一定値の充電電力と DC 及び PCS2 による連続値の放電電力を合計することで，蓄電系による連続値の充放電電力を実現しているためである．よって，蓄電系の出力  $P_B$  は以下の式で与えられる．

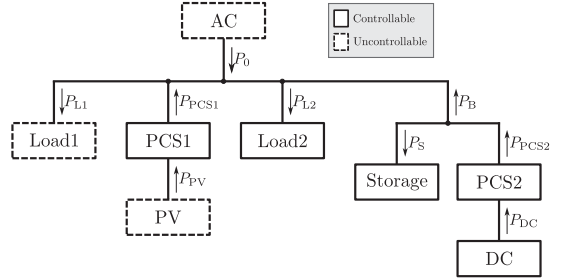


図 3 実機シミュレータのブロック線図

Fig. 3 Block diagram of hardware simulator.

$$P_B := P_{PCS2} - P_S \quad (1)$$

## 3. 線形時相論理に基づくモードスイッチング制御器の設計

本節では，文献 [12]～[14] に基づき，出力平準化に対するモードスイッチング制御器を設計する．まず，出力平準化に課す制御仕様を設定する．続いて，制御仕様を線形時相論理 (Linear Temporal Logic: LTL) [9] により記述し，ソフトウェア TuLiP [20] を採用し LTL からオートマトンを生成する．そして，生成したオートマトンをルールとするモードスイッチング制御器を構成する．

### 3.1 制御仕様

文献 [15] で提案された蓄電系による出力平準化制御は，計測された  $P_0$  を用いて積分器を含む出力フィードバックを行うものであり，蓄電系の指令値  $P_{Bref}$  は次式で決定される．

$$P_{Bref}[k+1] = P_{Bref}[k] + K(P_0[k] - P_{ref}) \quad (2)$$

このように，式 (2) の制御は単純な離散時間システムで記述されるため，制御器が生成する指令値  $P_{Bref}$  が蓄電系の出力可能な範囲から逸脱する場合が生じ得る．これは，図 4 の左に示す場合に相当し，式 (2) の指令値を出力できず，蓄電系のみでは出力平準化が達成できない．

本論文のモードスイッチング制御では，上記の逸脱する状況においても，フィードバックに基づく離散時間制御器により出力平準化を実現するために，蓄電系以外の家庭内電力システムの電力機器の制御を併用する．具体的には，蓄電系のみで平準化が実現可能な指令値の最小値  $P_{Bmin}$  より現在の指令値  $P_{Bref}$  が小さ

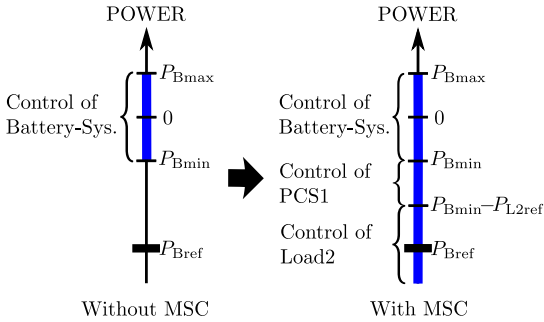


図 4 出力平準化が達成可能な蓄電系への指令値  $P_B$  の範囲。モードスイッチング制御 (MSC) により達成可能な範囲を拡大させる。

Fig. 4 Range of  $P_B$  enabling output levelling of in-home power system with and without Mode Switching Control (MSC).

い場合 ( $P_{Bref} < P_{Bmin}$ ), 蓄電系に加えて PCS 及び Load2 の制御を併用する。その結果, 図 4 の右に示すように, 出力平準化が達成可能な指令値の範囲を拡大し,  $P_{Bmin}$  より小さい  $P_{Bref}$  に対して平準化を達成させる。ただし, PCS の制御は PV の出力抑制に相当し, 再生可能エネルギーの有効利用の観点からは望ましくない。そこで, Load2 の制御を PCS の制御より優先して行う。なお, 指令値が蓄電系のみで平準化が達成可能な指令値の最大値より大きい場合, すなわち  $P_{Bref} > P_{Bmax}$  となった場合は, 複数の家庭間の電力融通などの併用が考えられるものの, 一軒の家庭内で対応することは困難であるため, 本論文の制御器設計では対象としない。以下において, 制御器が対応しないことをデッドロックと呼び, 蓄電系を含む全ての機器の制御は停止するものとする。また, Load2 は電気自動車の充電を想定していることから, 充電可能な時間数を制限する必要がある。具体的には, 累積充電時間  $T$  を変数として導入し, Load2 の制御が行われた次の時刻において  $T$  に 1 を加算する。そして, 最大充電可能時間  $T_{max}$  に対して  $T < T_{max}$  を満たす場合のみ Load2 の制御が可能とする。

### 3.2 線形時相論理による制御仕様の表現 [13]

本論文で提案する制御仕様は, 環境の変化に応じて機器の動作モードを変更するリアクティブシステム [21] を実現するものである。リアクティブシステムの仕様を表す命題  $\phi$  は, LTL により以下のとおり表現される [13].

$$\phi = (\phi_e \rightarrow \phi_s) \tag{3}$$

$\phi_e$  はシステム外部の環境に対する仕様を表す命題の積集合であり,  $\phi_s$  は制御に対する仕様の命題の積集合である。この式により,  $\phi_e$  という仮定のもとで  $\phi_s$  という制御を行うという制御器の動作を記述できる。また, 環境と制御とのゲームとして上記を考えた場合, 相手 (環境) がする行動や変化をあらかじめ想定 ( $\phi_e$ ) しておき, 自分 (制御) はその想定に対応する戦略 ( $\phi_s$ ) を用意しておくものと捉えることができる。以上より, リアクティブシステムの仕様を記述するためには, 環境及び制御に対する仕様の LTL を記述すればよいことになる。

### 3.3 線形時相論理による制御仕様の記述

まず, 環境の変化並びに家庭内機器の動作モードを, ブール代数の変数である環境変数並びに制御変数により表現する。そして, 両変数を用いて, 制御仕様を線形時相論理により記述する。その際に, Load2 が充電可能である場合と満充電となる場合に分けて記述を行う。

#### a) 環境変数の導入

本論文の制御の問題では, 家庭内の電力機器をいつ蓄電系と併用するかについて自動的に決定することが要点である。一度どの機器と蓄電系を併用するかについて決定すると, 出力平準化の達成が可能な指令値  $P_{Bref}$  の最大・最小値が定まる。具体的には, 蓄電系のみの場合の最大・最小値  $P_{Bmax}$  及び  $P_{Bmin}$  に加えて, 負荷の制御を併用した場合の最小値が  $P_{Bmin} - P_{L2ref}$  と定まる。これは, PCS 及び負荷の制御を加えた場合の指令値の上界と一致する。一方, 指令値  $P_{Bref}$  がどのような値を取るかは, 式 (2) に実際の出力  $P_0$  が含まれることから, 制御可能ではない PV の出力電力及び負荷の消費電力に依存する。このことを踏まえて, これらの指令値への影響を表す変数を環境変数と呼び, PV 及び負荷の影響を合わせて表す環境変数  $e_p \in \{0, 1, 2, 3\}$  を, 二つの論理変数  $e_{p1}$  及び  $e_{p2}$  により  $e_p = e_{p1} + 2e_{p2}$  として以下で定義する。

$$(e_{p2}, e_{p1}) := \begin{cases} (0, 0) & (P_{Bref} > P_{Bmax}) \\ (0, 1) & (P_{Bmax} \geq P_{Bref} \geq P_{Bmin}) \\ (1, 0) & (P_{Bmin} > P_{Bref} \geq P_{Bmin} - P_{L2ref}) \\ (1, 1) & (P_{Bmin} - P_{L2ref} > P_{Bref}) \end{cases} \tag{4}$$

ここで, 上式 (4) の条件に含まれている指令値  $P_{Bref}$



は陽に求められない．この  $P_{\text{Bref}}$  をどのように評価するかは本論文の制御器を実装する上で解決すべき内容であり，4.1 で詳しく説明する．

#### b) 制御変数の導入

続いて，PCS の出力抑制及び Load2 に相当する電気自動車への充電動作（以下では簡単のため，Load2 の充電と書く）を制御変数  $s_{12}$ ,  $s_{\text{pcs}}$  により表現する．

$$s_{12} := \begin{cases} 0 & (\text{Load2 を投入しない}) \\ 1 & (\text{Load2 を投入し,} \\ & T \text{ に 1 を加算する}) \end{cases} \quad (5)$$

$$s_{\text{pcs}} := \begin{cases} 0 & (P_{\text{PCS1}} \text{ に制限を加えない}) \\ 1 & (P_{\text{PCS1}} \text{ に制限を加える}) \end{cases} \quad (6)$$

また，Load2 が満充電となる場合を仕様として記述するために，Load2 の充電状況を示す制御変数を導入する．

$$s_{\text{full}} := \begin{cases} 0 & (\text{Load2 が満充電でない}) \\ 1 & (\text{Load2 が満充電である}) \end{cases} \quad (7)$$

#### c) 制御仕様の記述

まず，初期状態を  $\varphi_{\text{init}}$  として LTL で記述する．なお，LTL の記述法については付録を参照されたい．環境変数の初期値は，蓄電系のみを制御により平準化可能な値とする．また，初期状態では Load2 及び PCS の制御は行っておらず，Load2 は満充電ではないものとして制御変数を初期化する．以上の仕様は，LTL により以下のとおり記述される．

$$\varphi_{\text{init}}^e := (e_{p1} \wedge (\neg e_{p2})) \quad (8)$$

$$\varphi_{\text{init}}^s := (\neg s_{12}) \wedge (\neg s_{\text{pcs}}) \wedge (\neg s_{\text{full}}) \quad (9)$$

次に，環境変数の仕様を  $\varphi_{\text{safe}}^e$  として LTL で記述する．本論文において， $P_{\text{Bref}} > P_{\text{Bmax}}$  とならないことを想定する．この仕様は，LTL により以下のとおり記述される．

$$\varphi_{\text{safe}}^e := \square \{e_{p1} \vee e_{p2}\} \quad (10)$$

続いて，制御変数の仕様を  $\varphi_{\text{safe}}^s$  として LTL で記述する．環境変数  $e_{p1}$  及び  $e_{p2}$  の値に対応した制御方略を式 (3) の形式で記述する．まず， $(e_{p2}, e_{p1}) = (0, 1)$  の場合には Load2 の投入及び PCS1 の出力抑制は行わない．これは LTL により以下のとおり記述される．

$$\varphi_{\text{safe},1}^s := \square \{e_{p1} \wedge (\neg e_{p2})\}$$

$$\rightarrow ((\neg s_{12}) \wedge (\neg s_{\text{pcs}})) \quad (11)$$

次に， $(e_{p2}, e_{p1}) = (1, 0)$  の場合には  $s_{\text{full}} = 0$  ならば Load2 の投入を行い， $s_{\text{full}} = 1$  すなわち  $T = T_{\text{max}}$  ならば PCS1 の出力抑制を行う．これは LTL により以下のとおり記述される．

$$\varphi_{\text{safe},2}^s := \square \{((\neg e_{p1}) \wedge e_{p2} \wedge (\neg s_{\text{full}})) \rightarrow ((\neg s_{\text{pcs}}) \wedge s_{12})\} \quad (12)$$

$$\varphi_{\text{safe},3}^s := \square \{((\neg e_{p1}) \wedge e_{p2} \wedge s_{\text{full}}) \rightarrow (s_{\text{pcs}} \wedge (\neg s_{12}))\} \quad (13)$$

更に， $(e_{p2}, e_{p1}) = (1, 1)$  の場合には PCS1 の出力抑制を行うことに加えて， $s_{\text{full}} = 0$  であれば Load2 を投入する．これは LTL により以下のとおり記述される．

$$\varphi_{\text{safe},4}^s := \square \{(e_{p1} \wedge e_{p2} \wedge (\neg s_{\text{full}})) \rightarrow (s_{\text{pcs}} \wedge s_{12})\} \quad (14)$$

$$\varphi_{\text{safe},5}^s := \square \{(e_{p1} \wedge e_{p2} \wedge s_{\text{full}}) \rightarrow (s_{\text{pcs}} \wedge (\neg s_{12}))\} \quad (15)$$

最後に， $s_{\text{full}}$  に関する制御仕様を記述する．Load2 の充電状況の観点から， $T < T_{\text{max}} - 1$  である場合と  $T \geq T_{\text{max}} - 1$  である場合に分けて記述を行う．Load2 が充電可能である  $T < T_{\text{max}} - 1$  の場合， $s_{\text{full}}$  は常に 0 である．これは LTL により以下のとおり記述される．

$$\varphi_{\text{safe},6}^s := \square \{\neg s_{\text{full}}\} \quad (16)$$

また， $T \geq T_{\text{max}} - 1$  である場合， $T = T_{\text{max}} - 1$  である時刻に Load2 の充電が行われると  $s_{\text{full}}$  が 1 となる．これは LTL により以下のとおり記述される．

$$\varphi_{\text{safe},7}^s := \square \{s_{12} \rightarrow (\bigcirc s_{\text{full}})\} \quad (17)$$

以上の命題を用いて，制御仕様全体を式 (3) の形式にまとめることができる． $T < T_{\text{max}} - 1$  である場合を  $\phi_1$ ， $T \geq T_{\text{max}} - 1$  である場合を  $\phi_2$  すると，以下のとおり記述される．

$$\phi_1 := (\varphi_{\text{init}}^e \wedge \varphi_{\text{safe}}^e) \rightarrow \left( \varphi_{\text{init}}^s \wedge \bigwedge_{i=1}^5 \varphi_{\text{safe},i}^s \wedge \varphi_{\text{safe},6}^s \right) \quad (18)$$

$$\phi_2 :=$$

表 1  $\varphi_1$  の真理値表  
Table 1 Truth table of  $\varphi_1$ .

$e_p$	$e_{p2}$	$e_{p1}$	$s_{full}$	$s_{full}$	$s_{l2}$	$s_{pcs}$
0	0	0	0	0	*	*
1	0	1	0	0	0	0
2	1	0	0	0	1	0
3	1	1	0	0	1	1

表 2  $\varphi_2$  の真理値表  
Table 2 Truth table of  $\varphi_2$ .

$e_p$	$e_{p2}$	$e_{p1}$	$s_{full}$	$s_{full}$	$s_{l2}$	$s_{pcs}$
0	0	0	0	0	*	*
0	0	0	1	1	*	*
1	0	1	0	0	0	0
1	0	1	1	1	0	0
2	1	0	0	1	1	0
2	1	0	1	1	0	1
3	1	1	0	1	1	1
3	1	1	1	1	0	1

$$(\varphi_{init}^e \wedge \varphi_{safe}^e) \rightarrow \left( \varphi_{init}^s \wedge \bigwedge_{i=1}^5 \varphi_{safe,i}^s \wedge \varphi_{safe,7}^s \right) \quad (19)$$

上記制御仕様の真理値表を表 1 及び 2 に示す.

### 3.4 スイッチングルールの生成

論理式  $\phi_1$  及び  $\phi_2$  から, TuLiP [20] を援用してオートマトンを生成する. 結果を図 5 に示す. 図中では, 環境変数  $e_{p2}$ ,  $e_{p1}$  をまとめた変数  $e_p := (e_{p2}, e_{p1})_2$  を用いている.  $T < T_{max} - 1$  の場合は, 論理式  $\phi_1$  により生成したオートマトンに従う. そして,  $T = T_{max} - 1$ ,  $T_{max}$  となった場合は, 論理式  $\phi_2$  により生成したオートマトンに従う. 各オートマトンにおける接点は制御モードを表し, 家庭内電力システムの各機器の制御方策を決定する. なお, 二つのオートマトンにおけるモード 0, 1, 2, 3 は同じ制御モードを表す.

例として, PV の発電量が一度増加して減少する場合を考える. 以下では, 環境変数及び制御モードの初期状態は共に 1 とする. まず, 基本的な場合として,  $T < T_{max} - 1$  において環境変数  $e_p$  が 1, 2, 3, 2, 1 と変化することを想定する. すると, 図 5(a) のオートマトンにおいて,  $e_p$  の 1, 2, 3 という発電電力が増加する変化に対し, 初期のモード 1 から, 動作機器を追加するモード 1, 2, 3 へ遷移する. そして,  $e_p$  の 3, 2, 1 という発電電力が減少する変化に対し, モード 3 から, 動作機器を削減するモード 3, 2, 1 へ遷移する. 続いて, Load2 が満充電となる場合として,  $e_p$  が 1, 2, 3 と変化した際に  $T = T_{max} - 1$  となり, その後に

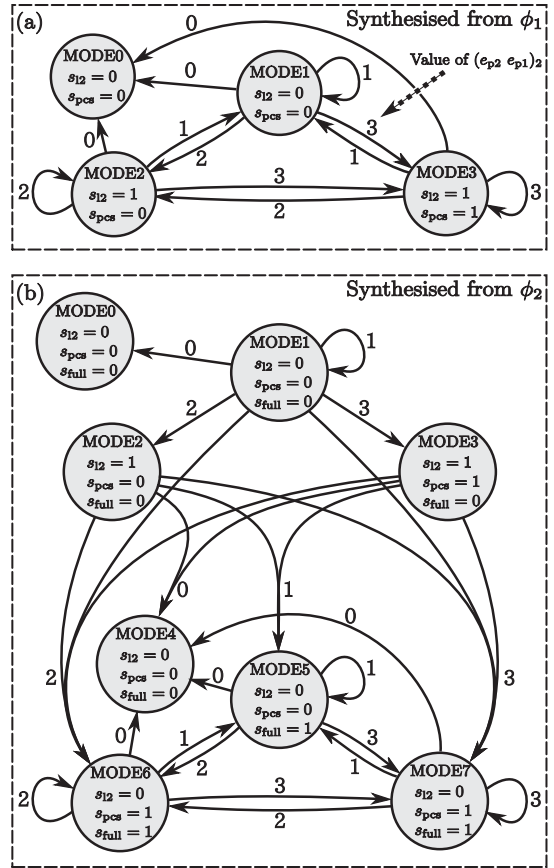


図 5 LTL により生成されたモードスイッチングルール. 環境変数の変化に応じて, 制御仕様を満たすように各機器の制御方策を決定するモードを選択する.

Fig. 5 Mode switching rules synthesised from LTL. The rules react to changes of environmental variables and select one mode representing a set of control strategies for every device to achieve the control specifications.

3, 2, 1 と変化することを想定する. すると, 先程と同様に, 図 5(a) のオートマトンに従い,  $e_p$  の 1, 2, 3 という変化に対してモードが 1, 2, 3 と遷移する. ここで,  $T = T_{max} - 1$  となると, オートマトンが (a) から (b) へと変わり, 等価なモード 3 へと移る. 続いて, その直後の  $e_p$  が 3 である時刻に Load2 が満充電となると,  $s_{full} = 1$  となり, モード 7 へと遷移する. そして,  $e_p$  の 3, 2, 1 という変化に対し, モードが 7, 6, 5 と遷移する. 最後に, 発電量が少なくなかつ負荷消費電力が大きくなったために  $e_p$  が 0 となる場合を想定する. この場合, 任意のモードから  $s_{full}$  の値に応じてモードが 0 若しくは 4 に遷移し, それ以降モー

ドは遷移しない．これをデッドロックと呼んでいる．

#### 4. 実機実験

本節では、実機シミュレータにモードスイッチング制御器を実装し、2種類の環境変化に対する結果を詳述する．いずれもPV発電電力及び負荷消費電力の実測時系列データを用いる．まず、デッドロックが発生しない場合のモードスイッチング制御の実験結果を説明し、環境変化に応じて制御モードが切り替わる様子を詳しく示す．この実験を以下では実験1と呼ぶ．続いて、デッドロックに至る場合のモードスイッチング制御の実験結果を説明する．後者の実験を以下では実験2と呼ぶ．

##### 4.1 制御器の実装と実験設定

###### a) 制御器の実装

実機実験に向けて、生成したモードスイッチングルールをシミュレータに実装する．まず、制御変数の実装について説明する．Load2の投入については、電子負荷2の消費電力を $P_{L2}$ と設定した上で、実際に消費するかどうかを $s_{12}$ に応じて決定する．PCS1の出力抑制については、 $s_{pcs} = 1$ の場合の制限値 $P_{limit}$

$$P_{limit} = P_{PCS1} - P_B + P_{Bmin} + P_{L2ref} \quad (20)$$

を計算した上で、 $s_{pcs} = 1$ ならば $P_{PCS1}$ を $P_{PV}$ と $P_{limit}$ を比較して小さい値と設定し、 $s_{pcs} = 0$ ならば $P_{PV}$ と設定した上で、実際に出力する．以上の動作を表3にまとめる．

続いて、環境変数の実装について説明する．環境変数 $e_{p1}$ 及び $e_{p2}$ の実装では、式(4)より $P_{Bref}$ を評価することが必要である．PCS1の出力抑制を実施した場合、上記のように $P_{PCS1}$ の測定値は本来PVが出力可能な値 $P_{PV}$ と異なる可能性がある．具体的には、 $P_{PV} \leq P_{limit}$ であれば $P_{PCS1} = P_{PV}$ 、 $P_{PV} > P_{limit}$ であれば $P_{PCS1} < P_{PV}$ となる．この二つの場合で、PCSの出力抑制が単純な線形動作ではないことにより、 $P_{Bref}$ を減少させる際に取りべき動作が異なる．前者では、PCSの出力抑制が測定値に影響していないため、式(2)により $P_{Bref}$ を導出して理論どおりの制

御を行う．一方で、後者では、PCSの出力抑制によりPVの発電量が抑えられているため、 $P_{PCS1}$ が $P_{PV}$ の値を出力するまでモードを遷移させずに、 $P_{limit}$ の制限を緩和(値を上昇)する必要がある．しかし、式(2)により求めた $P_{Bref}$ には $P_{PCS1}$ の影響のみが伝達されるため、いずれの動作を取るべきか判定ができない．そこで、 $P_{PCS1}$ の測定値と抑制値 $P_{limit}$ を比較し、PCS1の出力抑制が実施されたか否かを表す変数 $e_{sup}$ を導入する．

$$e_{sup} := \begin{cases} 0 & (P_{PCS1} < P_{limit} - P_{mgn}) \\ 1 & (P_{PCS1} \geq P_{limit} - P_{mgn}) \end{cases} \quad (21)$$

なお、上式の $P_{mgn}$ は出力抑制実施の判定に余裕をもたせるためのパラメータであり、本論文では0.05kWとした．この $e_{sup}$ が1、すなわちPCS1の出力抑制が実施されている場合に、 $(e_{p2}, e_{p1})$ が(1, 1)から他の値に変化したならば、 $(e_{p2}, e_{p1})$ を(1, 1)にリセットする．これにより、本来の $(e_{p2}, e_{p1})$ の値を決定する．

###### b) 実験設定

実験に使用したパラメータの設定を表4に示す．PVの発電電力及びload1の消費電力は過去に実測した時系列データ[15]に基づく．実験1では実測データをそのまま使用し、実験2ではPV及びload1の時系列データに対して、それぞれ-0.5kW及び+0.3kWのバイアスを加えたデータをPV及びLoad1の入力に使用した．

##### 4.2 実験結果と考察

まず、実験1を通してモードスイッチング制御が仕様どおりに出力平準化が実現される場合を説明する．図6に実験結果を示す．図より、 $P_{PV}$ 及び $P_{L1}$ の変化に応じて制御モードが切り替わり、出力電力 $P_0$ が目標値0.7kW付近に調整されていることが分かる．得られた実験結果を考察する．実験において得られた $P_0$ の目標値からの誤差には、測定のスプリング周期である3秒間におけるPV及びLoad1の発電電力及び消費電力の変動が含まれる．よって、 $P_0$ の $P_{0ref}$ からの誤差が、制御器がうまく働いていないことに起因す

表3  $P_{PCS1}$ の決定  
Table 3 Decision of  $P_{PCS1}$ .

$s_{pcs}$	$P_{PCS1}$
0	$P_{PV}$
1	$\min\{P_{PV}, P_{limit}\}$

表4 パラメータの設定  
Table 4 Parameter setting.

Symbol	Unit	Exp.1	Exp.2
$P_{L2ref}$	kW	0.2	0.2
$P_{Bmax}$	kW	1.3	1.3
$T_{max}$		80	80
$P_{0ref}$	kW	0.7	-0.5
$K$		1	1



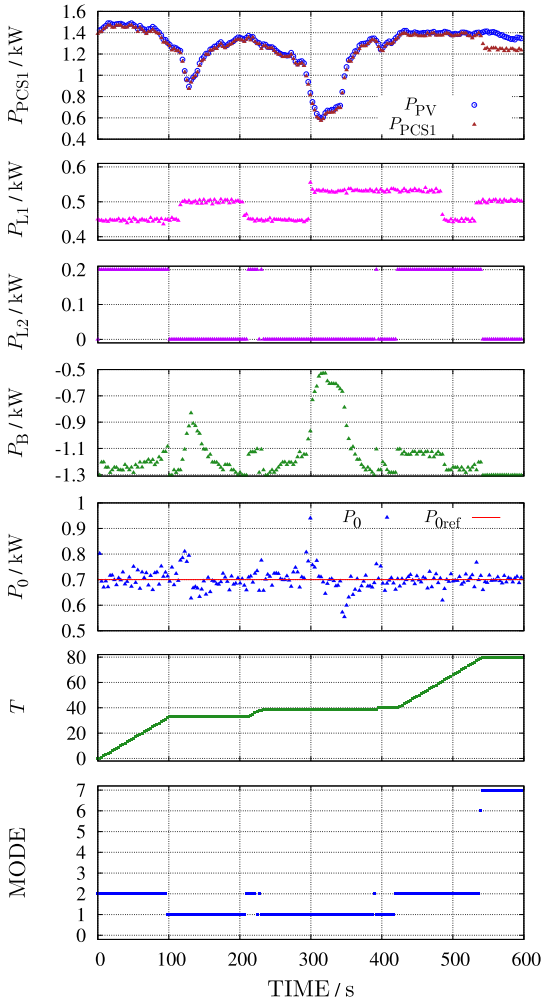


図 6 モードスイッチング制御の実験結果

Fig. 6 Experimental result of mode switching control.

るのか、それとも制御の効果が1ステップ遅れて現れることに起因するかが直ちに判定できない。そこで、実験結果から1ステップの遅れのみ依存する変動を計算により取り除いた上で、モード切り替えの検証を行う。蓄電系による制御のみで設計上出力可能な  $P_0$  の最大値及び最小値を  $P_{0max}^*$  及び  $P_{0min}^*$  とし、モードスイッチング制御により出力可能な  $P_0$  の最大値及び最小値を  $P_{0max}$  及び  $P_{0min}$  とする。これらの電力値は以下により計算できる。

$$P_{0max}^* = P_0 + P_B + P_{Bmax} - (P_{L2} + P_{Suppress})$$

$$P_{0min}^* = P_0 + P_B - P_{Bmax} - (P_{L2} + P_{Suppress})$$

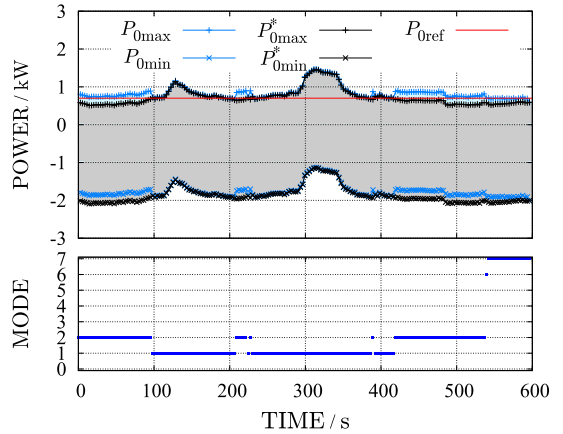


図 7  $P_0$  の達成可能な範囲の比較.  $[P_{0min}^*, P_{0max}^*]$  はモードスイッチング制御を行わない場合に達成可能な範囲,  $[P_{0min}, P_{0max}]$  はモードスイッチング制御を行う場合に達成可能な範囲を示す.

Fig. 7 Comparison of achievable ranges of  $P_0$ . The interval  $[P_{0min}^*, P_{0max}^*]$  shows the range without mode switching control, and  $[P_{0min}, P_{0max}]$  the achievable range with mode switching control.

$$P_{0max} = P_{0max}^* + \bigcirc P_{L2} + \bigcirc P_{Suppress}$$

$$P_{0min} = P_{0min}^* + \bigcirc P_{L2} + \bigcirc P_{Suppress}$$

ただし、 $P_{Suppress}$  は PCS1 の制御により抑制された電力、つまり  $P_{PV} - P_{PCS1}$  である。また、 $\bigcirc$  は次の時刻を表す記号であり、 $\bigcirc P_{L2}$  及び  $\bigcirc P_{Suppress}$  は次の時刻の  $P_{L2}$  及び  $P_{Suppress}$  の値を表す。以上の変数及び  $P_{0ref}$  をプロットすることにより、出力可能な  $P_0$  の範囲がモードスイッチング制御によってどのように変化しているかが確認できる。その結果を図 7 に示す。蓄電系による制御のみで出力可能な  $P_0$  の範囲は、 $P_{0max}^*$  と  $P_{0min}^*$  の間である。この範囲から  $P_{0ref}$  が逸脱した場合に、モードスイッチング制御により出力可能な  $P_0$  の範囲が  $P_{0max}$  と  $P_{0min}$  の間になり、設計上  $P_0 = P_{0ref}$  が可能となる。よって、実験においてモード切り替えが制御仕様どおりに行われていることが確かめられた。

続いて、実験 2 を通じてモードスイッチング制御がデッドロックに至る場合を説明する。実験結果を図 8 に示す。300 秒付近において、平準化が達成できる場合と比較して  $P_{L1}$  の値が大きくなり、 $P_{PCS1}$  の値が小さくなった。この結果、平準化が不可能な環境変数の値となりデッドロックが生じ、全ての制御が停止した。これは前節において設計したとおりの動作であり、

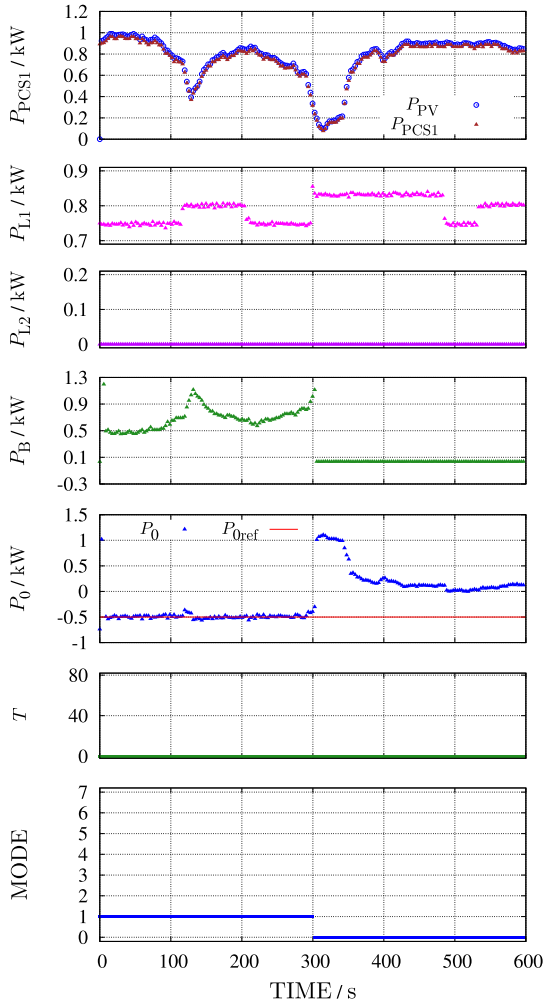


図 8 デッドロックに至るモードスイッチング制御の実機実験  
 Fig. 8 Experimental result of mode switching control that finally reaches the deadlock operation.

デッドロックに至る場合においても制御器が仕様どおり動作していることが確かめられた。

### 5. 数値的評価

本章では、前節で実験的に検証したモードスイッチング制御器の性能評価を数値シミュレーションにより行う。まず、数値シミュレーションで用いる入力データ及び設定について説明する。そして、シミュレーション結果を示し、ヒストグラムを用いて制御性能の数値的評価を行う。

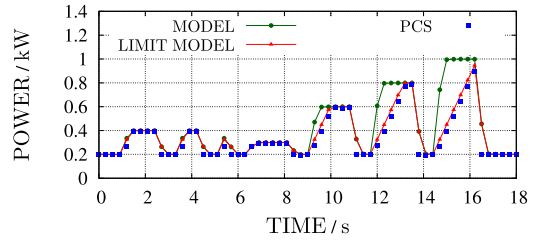


図 9 PCS の有効電力応答の実機及びモデルの比較  
 Fig. 9 Comparison of active power outputs in PCS by actual machine and mathematical model.

#### 5.1 数式モデル

本検討では、設計した制御器の評価のために数式モデルを用いる。この数式モデルは、ストレージの出力と配線内の抵抗成分の測定及び PCS のシステム同定結果をもとに作成した。一方、PCS を除いた他の機器のダイナミクスは十分速く、シミュレーションの計算間隔 3 秒のもとでは現れないので、本数式モデルでは考慮しないものとした。まず、ストレージの出力及び配線の抵抗成分を、定常特性の測定結果からモデル化した。このモデルは、常に 0.131kW の電力を消費する負荷、蓄電池の充電している場合に消費される電力 1.34kW 及び純抵抗 0.698Ω により構成される。このモデルを用いた数値シミュレーションでは、負荷消費の変化に加えて純抵抗の電力消費による変化も  $P_0$  に表れる。続いて、蓄電系内の PCS のモデルについて、システム同定 [22], [23] により二次の入出力応答が得られた (なお、パルス伝達関数を同定するに当たってのサンプリング間隔は 0.3 秒である)。

$$G_2(z) = \frac{0.680z^{-1} + 0.312z^{-2}}{1 - 0.00572z^{-1} - 0.00378z^{-2}} \quad (22)$$

上記モデル並びに実機の出力応答を図 9 の MODEL 並びに PCS に示す。この二つ応答の比較からも見て取れるが、実機には上昇の傾きに制限が存在する。そこで、上昇の傾きに制限をかけることにより実機の特徴を示すモデルを得た。

$$P_{PCS}[k] = \begin{cases} G_2(q) P_{PCSref}[k] & (P'[k] \leq P_{slope}) \\ P_{PCS}[k-1] + P_{slope} & (P'[k] > P_{slope}) \end{cases} \quad (23)$$

ただし、 $q$  はシフトオペレータ [22] であり、 $qy(k) = y(k+1)$  を満たす。また、 $P'(k) = G_2(q) P_{PCSref}[k] -$

$P_{PCS}[k-1]$  とし,  $P_{slope}$  は傾きの制限値を表す. 制限を加えたモデルを図9のLIMIT MODELに示す. 以上により, PCS2は式(23)を用い, PCS1及びLoad1は入力データをそのまま出力し, Load2は0.2kW若しくは0kWのいずれかを出力するものとする. 以上の要素により数式モデルを構成する. このモデルから $P_0$ の算出式が以下のとおり得られる.

$$P_0 = P_{L1} + P_{L2} + P_s + 0.698 \Omega \cdot \left( \frac{P_{L1} + P_{L2}}{100V} \right)^2 + 0.131 \text{ kW} - P_{PCS1} - P_{PCS2} \quad (24)$$

### 5.2 数値シミュレーション

本検討では, 上記数式モデルの $P_{PV}$ として2日分の実測時系列データを用いる. このデータを図10(a1)

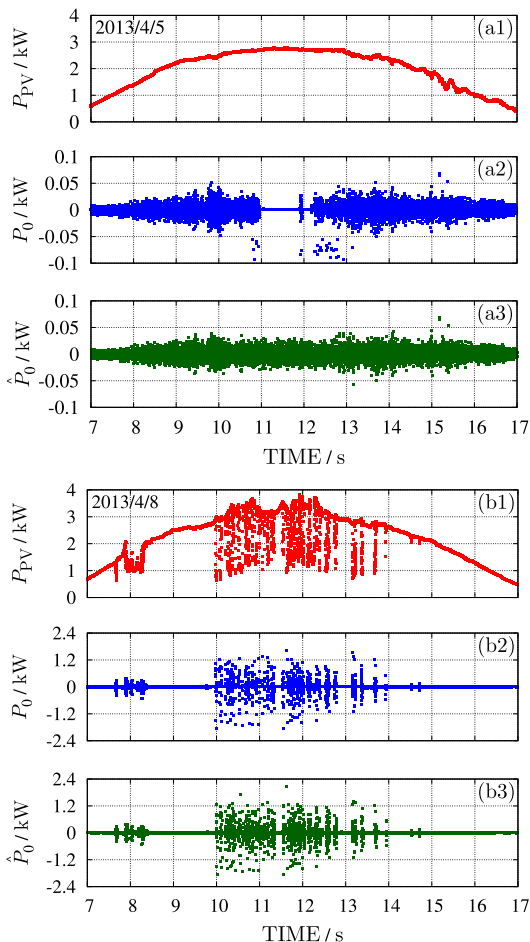


図10 モードスイッチング制御の数値シミュレーション  
Fig.10 Simulation results of mode switching control.

及び(b1)に示す. PV発電量の変化に対する出力平準化の性能を検討するため, Load1の出力は1kWで一定とする.  $P_{0ref}$ は0kWとする. シミュレーションの計算間隔は実機実験と同じ3秒とする. 以上の設定に対する数値シミュレーション結果を図10(a2)及び(b2)に示す. 制御量である出力電力 $P_0$ が目標値 $P_{0ref}$ である0kW付近で変動していることが分かる.

次に, 積分器を含んだフィードバック制御がモードスイッチング制御のもとで正しく動作しているかを確認するために, モードスイッチング制御を用いずにフィードバック制御のみを用いた場合の $P_0$ の理論値 $\hat{P}_0$ を求める. これは, 蓄電系の充電及び放電電力の最大値を考慮せず, 任意の値が出力可能であると仮定し, 仮想的に積分器を含んだフィードバック制御を行うことに相当する. 結果を図10(a3)及び(b3)に示す. (a2)及び(b2)と比較して, 最大誤差幅のオーダーは同じであり, 概形も類似していることが分かる.

続いて, シミュレーション結果とフィードバック制御の理論値を比較して平準化性能の定量的評価を行うために,  $P_0$ と $\hat{P}_0$ のヒストグラムを示し, 不偏分散を算出する. ヒストグラムを図11に示す. (a)と(b)では日が異なり, 図(a1)及び(b1)にヒストグラム全体を示し, 図(a2)及び(b2)に頻度の少ない部分を見るために縦軸を拡大したヒストグラムを示す. また, 表5に $P_0$ 及び $\hat{P}_0$ の平均2乗誤差の算出結果を示す. 図11(a2)の拡大したヒストグラムにおいて,  $P_0$ の分布が $\hat{P}_0$ と比較してやや大きく広がっていることが分かる. これは, 4.1で導入した出力抑制実施の判定余裕 $P_{mgn}$ , 並びに5.1で述べた数理モデル内の純抵抗の電力消費による差異である.  $P_0$ では, 出力抑制を停止する場合に $P_{mgn} = 0.05 \text{ kW}$ 程度の誤差が生じ, 一定電力負荷を切り替える場合に純抵抗の消費電力が $\hat{P}_0$ よりも大きく変化する. 一方, 図11(b2)のヒストグラムでは,  $P_0$ と $\hat{P}_0$ で分布の広がりには差異はほとんど確認されない. これは, 図11(b)の4月8日には発電量の変動が大きく, 上述の誤差の影響が無視でき, 更にPCSの出力抑制により出力変動が抑えられたためと考えられる. 続いて, 表5の平均2乗誤差の算出結果を検討して性能の比較を行う. 発電量の変動の大きさが異なる両日に対して, 同じオーダーの平均2乗誤差の値が得られている. PVの変化が小さい4月5日には上述した消費電力の変化により平均2乗誤差が大きくなっているが, PVの変化が大きい4月8日に比べて小さな値であり, オーダーの変化もないため, フィー

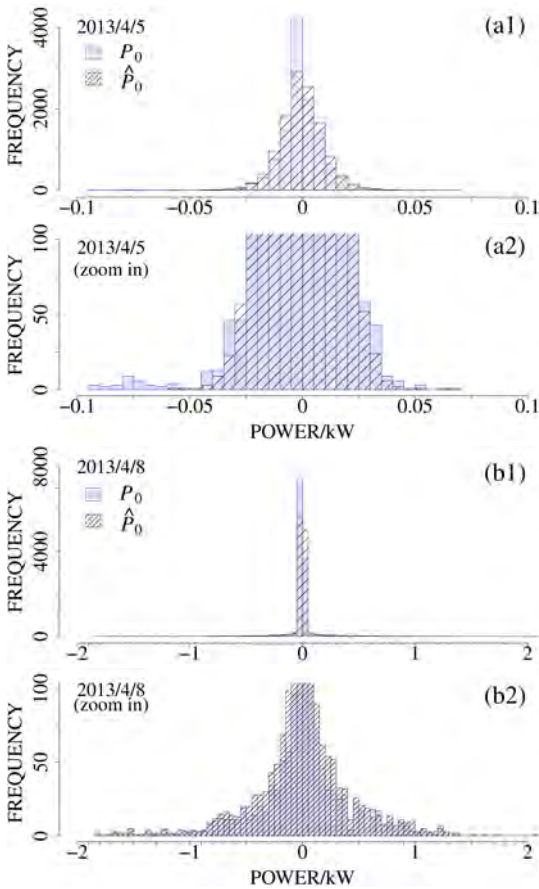


図 11 数値シミュレーションに対する出力電力のヒストグラム

Fig. 11 Histogram of output power for numerical simulations.

表 5 図 11 の平均 2 乗誤差

Table 5 Mean squared error of 図 11.

	April 5th	April 8th
$P_0$ : with MSC	$9.84 \times 10^{-5}$	$1.99 \times 10^{-2}$
$\hat{P}_0$ : without MSC	$8.85 \times 10^{-5}$	$2.47 \times 10^{-2}$

ドバック制御と平均 2 乗誤差の観点で同程度の性能が得られている。更に、PV の変動が大きい 4 月 8 日にはモードスイッチング制御の方が小さな平均 2 乗誤差が得られており、変動が大きい日にはフィードバック制御のみの場合より良い結果が得られる可能性を示している。

## 6. む す び

本論文では、家庭内電力システムの出力平準化に向けたモードスイッチング制御器を形式手法を用いて設

計し、設計した制御器を含むシステムの動作を実験的並びに数値的に検討した。実機シミュレータを用いてモードスイッチング制御器が制御仕様のとおり動作することを示した。そして、数式モデルを用いて文献 [15] の出力平準化制御と性能を比較し、2 日分の時系列データに対して平均 2 乗誤差の観点から同等の性能であることを明らかにした。これらにより、設計したモードスイッチング制御器が家庭内電力システムの出力平準化のために必要な性能を有していることを示した。今後の課題としては、制御機器の数や種類が増えた場合や、複数の実機の動作速度等が異なる場合等について、モードスイッチング制御器が要求どおりの性能を実現するかなどについて議論する必要がある。

謝辞 本論文の研究に関して御助言を頂いた緒方司郎様（オムロン株式会社）並びに査読者の皆様に厚く御礼申し上げます。

## 文 献

- [1] 豊崎智広, 水谷麻美, 丹野 勉, “電力の安定供給を実現する定置型蓄電池システム,” 東芝レビュー, vol.68, no.8, pp.14–17, Aug. 2013.
- [2] 林 秀樹, “再生可能エネルギー導入をもたらすエネルギー管理と蓄電池制御,” IEEJ Journal, vol.132, no.10, pp.684–687, Oct. 2012.
- [3] 北海道電力株式会社, “太陽光発電設備の出力変動緩和対策に関する技術要件,” [http://www.hepco.co.jp/energy/recyclable\\_energy/fixprice\\_purchase/pdf/solar\\_power\\_pv\\_tec.pdf](http://www.hepco.co.jp/energy/recyclable_energy/fixprice_purchase/pdf/solar_power_pv_tec.pdf).
- [4] 北海道電力株式会社, “風力発電設備の出力変動緩和対策に関する技術要件,” [http://www.hepco.co.jp/energy/recyclable\\_energy/fixprice\\_purchase/pdf/wind\\_power\\_pv\\_tec.pdf](http://www.hepco.co.jp/energy/recyclable_energy/fixprice_purchase/pdf/wind_power_pv_tec.pdf).
- [5] J.C. Knight, “Safety critical systems: Challenges and directions,” Proc. 24th International Conference on Software Engineering, IEEE, pp.547–550 May 2002.
- [6] 林 直樹, 高井重昌, “サイバーフィジカルシステムの研究動向と展望,” 計測と制御, vol.53, no.12, pp.1076–1079, Dec. 2014.
- [7] “Special Issue on Cyber-Physical Systems,” Proc. IEEE, vol.100, no.1, pp.6–299, Jan. 2012.
- [8] 蓮尾一郎, 末永幸平, “CPS の形式検証—超準解析によるアプローチ,” 計測と制御, vol.53, no.12, pp.1080–1085, Dec. 2014.
- [9] 産業技術総合研究所システム検証研究センター (編), モデル検査初級編: 基礎から実践まで 4 日で学べる, CVS 教程, ナノオプト・メディア, Nov. 2009.
- [10] 米田友洋, 梶原誠司, 土屋達弘, “ディベンダプルシステム—高信頼システム実現のための耐故障・検証・テスト技術,” p.105, 共立出版, 2005.
- [11] S. Patil, G. Zhabelova, V. Vyatkin, and B. McMillin, “Towards formal verification of smart grid distributed intelligence: Freedom case,” IECON2015,



- pp.3974–3979, Nov. 2015.
- [12] H. Xu, U. Topcu, and R.M. Murray, “A case study on reactive protocols for aircraft electric power distribution,” Proc. 51st Annual Conference on Decision and Control, pp.1124–1129, Dec. 2012.
- [13] H. Xu, Design, Specification, and Synthesis of Aircraft Electric Power Systems Control Logic, PhD thesis, California Institute of Technology, March 2013.
- [14] H. Xu, U. Topcu, and R.M. Murray, “Specification and synthesis of reactive protocols for aircraft electric power distribution,” IEEE Trans. Control Netw. Syst., vol.2, no.2, pp.193–203, Feb. 2015.
- [15] 山口佳彦, 薄 良彦, 引原隆士, “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準化制御,” システム制御情報学会論文誌, vol.28, no.7, pp.299–309, July 2015.
- [16] 吉澤康和, 新しい誤差論—実験データ解析法, p.15, 共立出版, 1989.
- [17] 齋藤 司, 薄 良彦, 引原隆士, “家庭内電力システムのモードスイッチング制御に関する実験的検討,” 電気学会産業応用部門大会講演論文集, p.Y-151, Sept. 2015.
- [18] 齋藤 司, 薄 良彦, 引原隆士, “家庭内電力システムの出力平準化のためのモードスイッチング制御の実機実験,” 自動制御連合講演会, p.1C2-3, Nov. 2015.
- [19] 系統連系専門部会 (編), 系統連系規定, p.108, 日本電気協会, 2013.
- [20] T. Wongpiromsarn, U. Topcu, N. Ozay, H. Xu, and R.M. Murray, “TuLiP: A software toolbox for receding horizon temporal logic planning,” Proc. 14th International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control, ACM, pp.313–314 April 2011.
- [21] N. Piterman, A. Pnueli, and Y. Sa’ar, “Synthesis of reactive(1) designs,” Proc. 7th International Conference on Verification, Model Checking, and Abstract Interpretation, vol.3855, pp.364–380, Lecture Notes in Computer Science, Springer Berlin Heidelberg, Jan. 2006.
- [22] 足立修一, システム同定の基礎, 東京電機大学出版局, 2009.
- [23] 片山 徹, システム同定入門, 朝倉書店, 1994.

## 付 録

### 線形時相論理 (LTL: Linear Temporal Logic)

本節では, 文献 [13] に基づき線形時相論理 (LTL) について説明する. 時相論理とは, 状態変化のシーケンスが正しいか否かを論理的に検査するために, 時間の概念を組み込んだ命題論理である [13]. LTL はこのような時相論理の 1 形式である.

LTL の記号や表記について説明する. LTL に用いる変数はブール変数であり, 一般的な命題論理で用いる以下の記号を定義する.

$\neg$ : negation,  $\vee$ : disjunction,  $\wedge$ : conjunction,  
 $\rightarrow$ : implication,  $\leftrightarrow$ : equivalence

LTL で重要な点は, 上記の記号に加えて時間の概念を表す記号を用いる点である. その中でも, 本論文で用いられる記号を以下に定義する. なお,  $\varphi$  は命題を表す.

•  $\bigcirc$ : next

$\bigcirc\varphi$  は, 次の時刻において  $\varphi$  が真であることを示す.

•  $\square$ : always

$\square\varphi$  は, 常時  $\varphi$  が真であることを示す.

(平成 28 年 8 月 29 日受付, 12 月 30 日再受付)



齋藤 司

2015 京大・工・電気電子卒. 現在同京都大学電気工学専攻修士課程在学中. エネルギーマネジメントシステムに関する研究に従事.



薄 良彦 (正員)

2005 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程修了. 同年京都大学助手, 2007 助教, 2011 講師, 2016 大阪府立大学准教授, 現在に至る. 2008-10 米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校機械工学科客員研究員. 応用非線形ダイナミクス, 電力・エネルギーシステム, 制御技術に関する研究に従事. 博士 (工学). システム制御情報学会賞論文賞 (2009, 2015 年度) などを受賞. システム制御情報学会, 電気学会, 電子情報通信学会, IEEE, SIAM などの会員.



引原 隆士 (正員:フェロー)

1987 京都大大学院博士課程指導認定退学. 京大工博. 関西大を経て, 1997 京大助教. 2001 同教授. 1993-94 Cornell 大学客員研究員. 非線形力学の工学的応用, パワーエレクトロニクス, 電気エネルギーシステム, MEMS の開発等の研究に従事. APS, SIAM, AIAA, IEEE, IEEJ, ISCIE 各会員.