

再生可能エネルギー有効利用のための次世代型 HEMS の開発

Development of Next-Generation HEMS for Effective Use of Renewable Energy

2019 年 8 月

間屋口 信博

D154704

1.目次

第1章 序論

- 1.1 研究背景
- 1.2 本論文の目的と各章の構成

第2章 蓄電池温度制約を考慮した HEMS 最適運用計画

- 2.1 モデル化
- 2.2 蓄電池の発熱と温度の関係
- 2.3 定式化
- 2.4 シミュレーション
- 2.5 考察とまとめ

第3章 様々な需要負荷に応じた HEMS 最適運用計画に関する研究

- 3.1 外気温度の導入
- 3.2 シミュレーション時間と精度に関する検討
 - 3.2.1 刻み時間について
 - 3.2.2 勾配情報の導入
 - 3.2.3 常微分方程式の数値的解法に関する検討
- 3.3 太陽光発電の余剰電力に関する検討
- 3.4 シミュレーション
- 3.5 考察とまとめ

第4章 蓄電池寿命特性を考慮した HEMS 最適運用計画

- 4.1 需要家モデル及び温度モデル
- 4.2 温度制約
- 4.3 寿命劣化抑制制約
- 4.4 最適運用計画の定式化
- 4.5 シミュレーション
 - 4.5.1 温度特性と寿命特性導入後の比較
 - 4.5.2 考察とまとめ
 - 4.5.3 長期間のシミュレーション
 - 4.5.4 考察とまとめ

第5章 MATLAB/Simulink を用いた HEMS の最適制御に関する研究

- 5.1 シミュレーションモデル
- 5.2 三相インバータと三相電源の同期投入方法
- 5.3 系統連系用三相インバータの制御方法
- 5.4 シミュレーション

5.5 考察とまとめ

第6章 BCPを考慮した災害時の地域連系に関する調査

6.1 BCPの概要

6.2 BCPを考慮した蓄電池運用計画

6.3 BCPを考慮したEMS制御

6.3.1 シミュレーションモデル

6.3.2 平均値モデルとスイッチングモデル

6.3.3 シミュレーション

6.3.4 実モデルに関する検討

6.4 災害時の地域連系の概要

6.5 地域連系を想定したEMSシミュレーション

6.6 考察とまとめ

第7章 結論

参考文献

謝辞

引用既発表文献

付録

1. GUIツールの開発
2. 構築画面
3. 基本入力から詳細入力の算出

第1章 序論

1.1 研究背景

低炭素社会の実現を目的として、太陽光発電などの再生可能エネルギーの大量導入が進んでいる。特に、住宅用太陽光発電の導入伸び率は著しく、家庭内での省エネ・創エネが現実になってきている (Home Energy Management System: HEMS)。また、電気料金低減と安定した電力供給のために家庭用蓄電設備の導入も進んでいる。

一方、東日本大震災を契機に、地震などの災害対策が重要視されていることから、近年、事業継続計画 (Business Continuity Planning: BCP) にも注目が集まっている。このような BCP では、太陽光発電 (Photovoltaic Power Generation: PV) や蓄電池 (Storage Battery: BT) が有効に活用されていくものと考えられる。

需要家に対しては、太陽光発電や蓄電池の最適導入量を決定する必要がある、また、各種制約を考慮しながら、非常時においても柔軟に各機器の運用を継続する必要がある。経済的かつ信頼上、最適な各機器の導入量・運用パターンを導出しなければならない。

1.2 本論文の目的と各章の構成

太陽光発電をはじめとした再生可能エネルギー電源や蓄電池を活用して、省エネルギー・創エネルギー、および災害時のエネルギー確保など、多目的な次世代型 HEMS に関連する研究を目的として、本論文の研究内容を以下のように7章から構成している。

第1章では、研究の背景として、太陽光発電などの再生可能エネルギーの導入について、特に東日本大震災以降注目を浴び、その中で事業継続計画 (Business Continuity Plan : BCP) で蓄電池が有効に活用されていくものと概説し、次に本研究の目的と位置付けについて述べる。第2章では、蓄電池内部の温度に着目し、温度特性を制約条件の一つとして最適化問題を解き、温度制約を考慮した蓄電池の最適運用計画について検証している。第3章では、第2章で構築した基本モデルを、より現実的な検証へと応用している。外気温度の導入や太陽光発電電力の余剰電力に関する検討を行い、従来の定式化の改善を検討している。第4章では、蓄電池の寿命特性を新たな制約条件として考慮し検証を行っている。寿命特性には、カレンダー寿命とサイクル寿命特性を考慮し、蓄電池の最適運用計画を提案している。第5章では、太陽光発電や蓄電池を有するマイクログリッドを様々な条件下で最適に制御する手法について検討している。第6章では、昨今の災害等における、事業者としての BCP の必要性を概説し、伴い必要となる蓄電池の運用計画並びに EMS 制御について、定式化とシステムモデルの検証を行っている。更に、各地域間における電力融通をシステムモデルにより検証している。第7章では、本研究を総括するとともに、残された問題点について言及する。

第2章 蓄電池温度制約を考慮した HEMS 最適運用計画

エネルギー管理システム (Energy Management System: EMS) において蓄電池は重要な役割を担っている。このため、蓄電池の特性を理解することは EMS の最適運用を実現する上で重要なことである。本研究では蓄電池の温度特性に着目して検討を行った。例えば、高温状態での保存は蓄電池の劣化を早める。また、極端な低温または高温での運用は安全性に関わる問題を引き起こす可能性もある。実際に、大型の系統用蓄電池では、エアコンが完備された専用コンテナに設置され、最適な動作が実現できるように温度管理がなされている。小型の車載用蓄電池では、限られたスペースに配置する都合上、冷却面でさまざまな検討がなされている。しかし、現段階で蓄電池の温度特性を考慮した蓄電池の最適運用計画に関する研究はほとんどされていない。

本章では、充放電に伴う蓄電池の発熱と蓄電池自身の温度、または環境温度の上昇の関係を用いて、温度制約を考慮した蓄電池の最適運用計画について検討する。

2.1 モデル化

本研究で対象とするモデルを図 2.1 に示す。図 2.1 に示すように需要家負荷は系統から購入する電力、太陽光発電、蓄電池 (BT) の放電電力でまかない、BT は電力会社から購入する電力のみで充電するものとする。

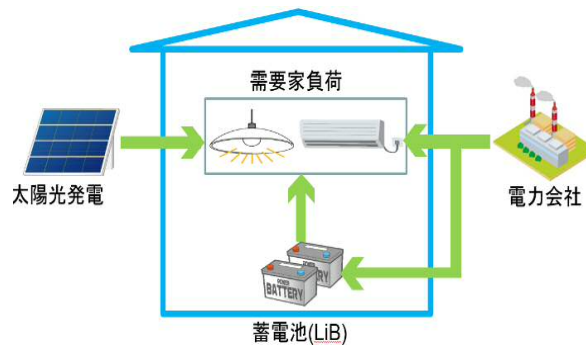


図 2.1 対象モデル

2.2 蓄電池の発熱と温度の関係

一般的に、BT の主な発熱要因は電池のエントロピー変化 (電池内部で起こる分子間の乱雑な変化) に起因するエントロピー発熱とジュール発熱 (電池の内部抵抗に依る) で構成されている。しかし、エントロピー発熱はジュール発熱に比べて非常に小さいとされている。

したがって、本研究では BT の発熱はジュール熱のみであると考える。

ジュール発熱 Q_j [W] は以下の式で表される。

$$Q_j(t) = I^2(t) \cdot R \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、 $I(t)$: 時間 t における BT を流入出する電流[A]、 R : BT の内部抵抗[Ω]である。(2.1)式について、ジュール発熱 $Q_j(t)$ は充電($I(t) > 0$)、放電($I(t) < 0$)ともに発熱となる。

また、BT から周囲の空気への放熱 Q_d [W]は次式で表される。

$$Q_d(t) = h \cdot A(T_{BT}(t) - T_{amb}(t)) \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで、 h :熱伝達係数[W/(m²·K)]、 A :BT の表面積[m²]、 $T_{amb}(t)$:時刻 t における周囲温度[K]である。

次に、BT の温度 T_{BT} と発熱の熱収支式は BT の熱容量 C_{BT} [J/K]を用いて次式で表される。

$$C_{BT} \frac{\partial T_{BT}(t)}{\partial t} = Q_j(t) - Q_d(t) \dots\dots\dots (2.3)$$

(2.3)式を用いると、蓄電池温度 $T_{BT}(t)$ は次式で表される。

$$T_{BT}(t+1) = \frac{Q_j(t) - Q_d(t)}{C_{BT}} D + T_{BT}(t) \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで、 D ：時間換算定数である。

また、蓄電池の設置された部屋が断熱壁を使用しているとし、空気の熱容量 C_{amb} [J/K]が一定とすると、周囲温度 T_{amb} は蓄電池からの放熱 Q_d によってのみ変化する変数となる。

$$T_{amb}(t+1) = \frac{Q_d(t)}{C_{amb}} D + T_{amb}(t) \dots\dots\dots (2.5)$$

2.3 定式化

本研究では、(2.4)、(2.5)式を用いて BT の使用温度範囲に関する制約を考え、温度制約として導入する。以下に目的関数と制約条件を示す。ただし、時間 t は 1 時間単位で変化する。

・目的関数

1 日の電気料金の最小化を目的関数とする。

$$\text{Minimize } \sum_{t=1}^{24} (c(t) \cdot P_s(t)) + c_{pd} \cdot P_s^{max} \dots\dots\dots (2.6)$$

・制約条件

[需給バランス制約]

$$P_s(t) = P_{LD}(t) - P_{PV}(t) + P_c(t) - P_d(t) \dots\dots\dots (2.7)$$

[充電、放電電力上下限式]

$$0 \leq P_c(t) \leq P_c^{max} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$0 \leq P_d(t) \leq P_d^{max} \dots\dots\dots (2.9)$$

[契約電力上限制約]

$$P_s(t) \leq P_s^{max} \dots\dots\dots (2.10)$$

[充放電差分方程式]

$$B(t+1) = B(t) + \eta \cdot P_c(t) - \frac{1}{\eta} \cdot P_d(t) \dots\dots\dots (2.11)$$

[残存容量上下限制約]

$$\alpha_l \cdot B_{max} \leq B(t) \leq \alpha_u \cdot B_{max} \dots\dots\dots (2.12)$$

[残存容量境界制約]

$$B(1) = B(25) = B_{ini} \dots\dots\dots (2.13)$$

[使用温度範囲制約]

$$T_{amb}^l \leq T_{amb}(t) \leq T_{amb}^u \dots\dots\dots (2.14)$$

[蓄電池の温度に関する制約]

$$T_{BT}(t+D) = \frac{Q_j(t) - Q_d(t)}{C_{BT}} D + T_{BT}(t) \dots\dots\dots (2.15)$$

ただし、 $I(t) = \frac{(P_c(t) + P_d(t)) \times 10^3}{V}$

[環境温度に関する制約]

$$T_{amb}(t+1) = \frac{Q_d(t)}{C_{amb}} D + T_{amb}(t) \dots\dots\dots (2.16)$$

[初期温度の設定]

$$T_{BT}(1) = T_{BT}^0, T_{amb}(1) = T_{amb}^0 \dots\dots\dots (2.17)$$

ただし、 $c(t)$: 時刻 t における買電単価[円/kWh]、 $P_s(t)$: 時刻 t における買電量[kWh]、 c_{pd} : 契約電力料金単価[円/kW]、 P_s^{max} : 最大買電電力[kW]、 $P_{LD}(t)$: 時刻 t における需要家負荷での消費電力量[kWh]、 $P_{PV}(t)$: 時刻 t における PV 発電電力量[kWh]、 $P_c(t), P_d(t)$: 時刻 t における BT の充電/放電電力量[kWh]、 P_c^{max} : BT の 1 時間あたりの最大充電量[kWh]、 P_d^{max} : BT の 1 時間あたりの最大放電量[kWh]、 $B(t)$: 時刻 t における BT の残容量 [kWh]、 η : BT の充放電効率、 B_{max} : BT の公称容量[kWh]、 α_l : 残容量下限率 α_U : 残容量上限率、 B_{in} : 初期容量[kWh]、 T_{amb}^u, T_{amb}^l : BT の使用温度上下限[K]、 D : 時間換算定数[s]、 V : BT の端子電圧[V]、 T_{BT}^0, T_{amb}^0 : BT の温度および周囲温度の初期温度[K]である。

2.4 シミュレーション

前節で述べた各種制約を満足し、目的関数(2.6)式を最小化するプログラムを作成した。本節ではそのシミュレーション結果について説明する。

<シミュレーション条件>

1 日 24 時点のシミュレーションを行う。BT は広島大学工学部 A1 棟地下の仕様とし、定格容量 1.2[kWh]、最大充電電力 1.2[kW]、最大放電電力 2.2[kW]、並列接続数 3 個とする。また、需要家負荷データと太陽光発電出力データを図 2.2 に示し、電気料金プラン(中国電力エコノミーナイトプラン)を表 2.1、各種パラメータを表 2.2 に示す。

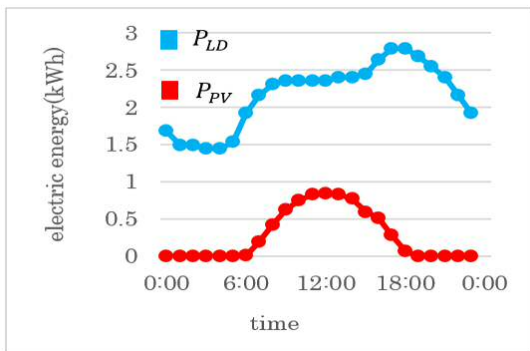


図 2.2 需要家負荷と太陽光発電出力

表 2.1 電気料金

	料金区分	単位	料金単価(円)
電力量料金	昼間 (8AM~11PM)	1kWh	21
	夜間 (11PM~8AM)	1kWh	10
契約電力料金		1kW	118.8

表 2.2 各種パラメータ

α_1 [%]	10	C_{amb} [J/K]	84455.7
α_2 [%]	90	D [s]	3600
B_{max} [kWh]	3.6	V [V]	51.2
P_c^{max} [kWh]	3.6	T_{amb}^l [K]	273(0°C)
P_d^{max} [kWh]	3.6	T_{amb}^u [K]	313(40°C)
η	0.9	T_{amb}^o [K]	303(30°C)
B_{inl} [kWh]	$B_{max}/6$	T_{BT}^o [K]	303(30°C)
h [W/m ² K]	10	R [Ω]	0.5
A [m ²]	0.4972	C_{BT} [J/K]	16000

<シミュレーション結果>

シミュレーションを行った結果を図 2.3~2.5、表 2.3 に示す。図 2.4 より、残存容量は、温度制約を考慮すると、0~8 時の蓄電池の総充電量が減少しており、蓄電池の充放電が制限されていることが分かる。これは、蓄電池の充放電によるジュール発熱を減らし、環境温度の上昇を抑制するためであると考えられる。その結果、買電電力のピーク値が増加するなどの影響が表れていることが分かる。実際に各条件の電気料金を見ると、温度制約の有無に関わらず蓄電池を導入することで電気料金は減少しているが、温度制約を考慮した場合の方が、温度制約を考慮しない場合よりも電気料金が増加するといった結果が得られた。

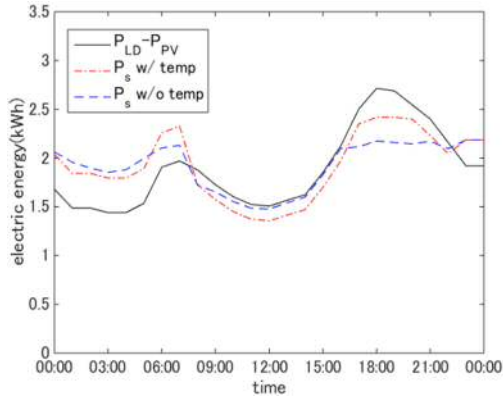


図 2.3 買電電力量と負荷

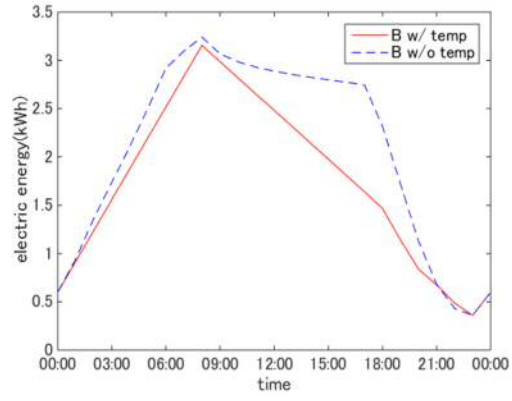


図 2.4 残存容量

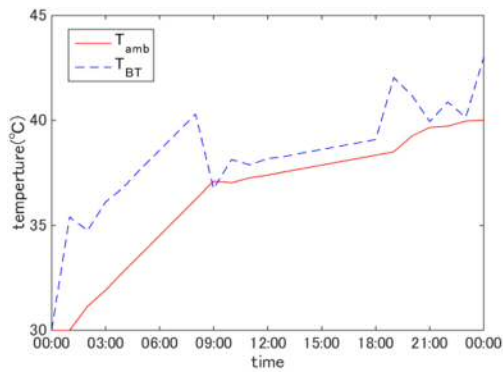


図 2.5 温度変化

表 2.3 電気料金試算結果

蓄電池	温度制約	電気料金(円)
無	無	797.9
有	無	773.4
有	有	775.0

2.5 考察とまとめ

本研究では、温度制約を考慮した蓄電池の最適運用計画のシミュレーションを行い、温度制約を考慮しない場合と比較し、温度制約により蓄電池の運用が制限されることを確認した。温度制約を考慮することで、充放電サイクルを抑え、結果として蓄電池の寿命を伸ばすことができると考えられる。しかし、具体的にどの程度蓄電池寿命を伸ばすことができるのかについては今後さらに検討を進めていくことにする。

第3章 様々な需要負荷に応じた HEMS 最適運用計画に関する研究

2章ではBTの充放電に伴う蓄電池の発熱と蓄電池自身の温度、または環境温度の上昇の関係をj用いて、温度制約を定義し、検討を行った。そして、使用温度範囲内のBT運用を導出し、温度制約により、電気料金が高くなることを確認した。しかし、外部との熱移動を考慮していない、また太陽光発電電力の制限など、より現実的なシミュレーションを行う必要があるといった課題がある。

本章では、外気温度の導入や太陽光発電電力の余剰電力に関する検討を行い、従来の定式化の改善を検討する。また、シミュレーション時間や精度をさらに向上させるために、常微分方程式の数値的解法の検討も行う。

3.1 外気温度の導入

図3.1に示すように、従来の断熱壁を一般的な壁に変更し、部屋内部と外気間の熱移動を考慮する。ここで、 Q_w [W]は外気間の熱移動量を示す。また、 T_{out} [K]は外気温度を示す。

Q_d は以下の式で表される。

$$Q_d(t) = h \cdot A(T_{BT}(t) - T_{amb}(t)) \dots\dots\dots (3.1)$$

Q_w は以下の式で表される。

$$Q_w(t) = K \cdot S(T_{out}(t) - T_{amb}(t)) \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで、 K : 熱貫流率[W/m²·K]、 S : 壁の表面積[m²]である。

(3.1)、(3.2)式を用いて、部屋内部の周囲温度 T_{amb} は以下の式のようにになる。

$$T_{amb}(t+1) = \frac{Q_d(t) + Q_w(t)}{C_{amb}} D + T_{amb}(t) \dots\dots\dots (3.3)$$

従来の放熱の要素に外気間の熱移動を加えた(3.3)式を用いることで、周囲温度は蓄電池の発熱と外気温度との関係で変化し、より現実的な条件のもとで温度制約を考慮した蓄電池の最適運用計画のシミュレーションを行うことができる。

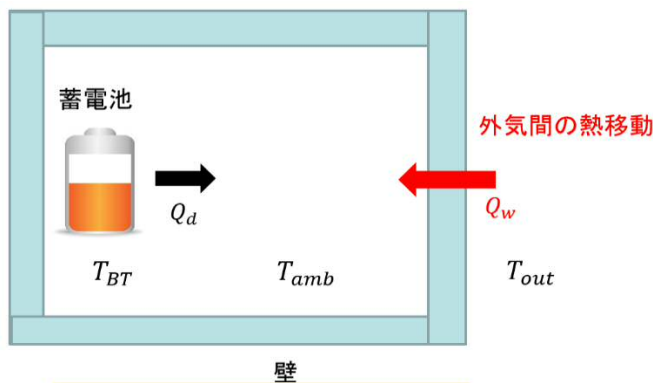


図 3.1 部屋内部と外気間の熱移動

3.2 シミュレーション時間と精度に関する検討

3.2.1 刻み時間について

従来は刻み時間 3600[s]固定にしていたが、温度の変化が大きくなるような条件では、温度が振動していた。そこで、刻み時間を自由に変更できるように、定式化の温度の制約条件式を変更した。具体的には、制約式内部は変えずに制約式の数を可変にすることで、刻み時間を変更できるようにした。

3.2.2 勾配情報の導入

MATLAB のソルバーでは、最適化計算の際に、目的関数及び制約条件の勾配を使用している。ユーザーが勾配を指定しない場合、ソルバーは有限差分法により勾配を推定する設定となっている。一方、ユーザーが勾配を指定した場合は、その勾配に従って最適化問題を解く。そのため、勾配を得るための有限差分推定を行う必要がなく、計算時間が減少し、より効率的になることが考えられる。現在用いている制約条件には、非線形部分が少なく、勾配を導入することによるメリットが大きいと考えて、勾配情報を導入する。

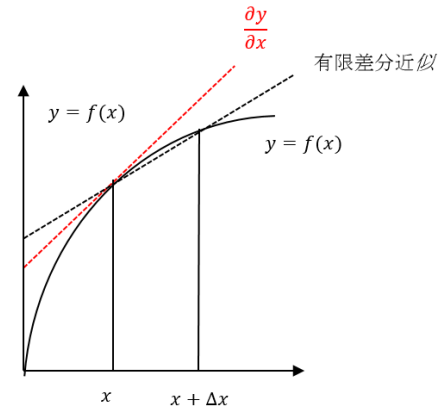


図 3.2 勾配の推定

3.2.3 常微分方程式の数値的解法に関する検討

従来までは、常微分方程式の数値的解法として、オイラー法を用いていた。オイラー法は非常に簡単な式で近似できるが、刻み時間の影響も大きく、誤差も大きいといった特徴がある。そこで、オイラー法より高精度な解法として知られる、ルンゲクッタ法と台形法の導入を検討した。

ここで、蓄電池の温度式が(3.4)式で表せるとする。

$$\frac{\partial T_{BT}}{\partial t} = f(t, T_{BT}(t), T_{amb}(t)) \dots\dots\dots (3.4)$$

オイラー法の場合は、(3.5)式のように簡単な式で表される

$$T_{BT}(t + \Delta t) = T_{BT}(t) + \Delta t \cdot f(t, T_{BT}(t), T_{amb}(t)) \dots\dots\dots (3.5)$$

・ルンゲクッタ法

ルンゲクッタ法の場合は、(3.6)式で表される。

$$T_{BT}(t + \Delta t) = T_{BT}(t) + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \dots\dots\dots (3.6)$$

ただし、

$$k_1 = \Delta t \cdot f(t, T_{BT}(t), T_{amb}(t))$$

$$k_2 = \Delta t \cdot f\left(t + \frac{\Delta t}{2}, T_{BT}(t) + \frac{k_1}{2}, T_{amb}(t) + \frac{s_1}{2}\right)$$

$$k_3 = \Delta t \cdot f\left(t + \frac{\Delta t}{2}, T_{BT}(t) + \frac{k_2}{2}, T_{amb}(t) + \frac{s_2}{2}\right)$$

$$k_4 = \Delta t \cdot f(t + \Delta t, T_{BT}(t) + k_3, T_{amb}(t) + s_3)$$

ここで、 $s_1 \sim s_3$ は周囲温度の常微分方程式をルンゲクッタ法で近似した場合の $k_1 \sim k_3$ に対応する係数である。

・台形法

台形法の場合は、(3.7)式で表される。

$$T_{BT}(t + \Delta t) = T_{BT}(t) + \frac{1}{2} \{ f(t, T_{BT}(t), T_{amb}(t)) + f(t + \Delta t, T_{BT}(t + \Delta t), T_{amb}(t + \Delta t)) \} \Delta t \dots\dots\dots (3.7)$$

周囲温度についても同様に常微分方程式の数値的解法を適用することで、近似式を得ることができる。

3.3 太陽光発電の余剰電力に関する検討

従来の定式化の場合、太陽光発電出力が需要家負荷を超えた条件には対応していなかった。そこで、需要家から系統への売電量を示す新たな変数 P_{sell} [kWh] を導入する。以下に、変更した目的関数および制約条件を示す。

・目的関数

Minimize

$$\sum_{t=1}^{24} (c(t) \cdot P_s(t) - c_{PV} \cdot P_{sell}(t)) + c_{pd} \cdot P_s^{max} \dots\dots\dots (3.8)$$

・制約条件

[需給バランス制約]

$$P_s(t) = P_{LD}(t) - P_{PV}(t) + P_c(t) - P_d(t) + P_{sell}(t) \dots\dots\dots (3.9)$$

[売電量の上下限]

$$0 \leq P_{sell}(t) \leq P_{sell}^u \dots\dots\dots (3.10)$$

ただし、 $P_{sell}^u = P_{PV} - P_{LD}$ かつ負の要素全て 0 とした値

ここで、 c_{PV} : 売電単価[円/kWh]、 $P_{sell}(t)$: 時刻 t における売電量[kWh]、 P_{sell}^u : 売電量上限[kWh]である。

3.4 シミュレーション

前節で述べた 3.1~3.3 章のシミュレーションを行う。加えて、需要家負荷と太陽光発電電力を変えたシミュレーションも行う。

[外気温度の導入]

・シミュレーション条件

1 日 24 時点のシミュレーションを行う。BT は広島大学工学部 A1 棟地下の蓄電池の仕様とし、定格容量 1.2[kWh]、最大充電電力 1.2[kW]、最大放電電力 2.2[kW]、並列接続数 3 個とする。また、需要家負荷データと太陽光発電出力データを図 3.3 に示し、電気料金プラン(中国電力エコノミーナイトプラン)を表 3.1、各種パラメータを表 3.2 に示す。外気温データは気象庁の過去気象データを参考、熱貫流率 $K=0.6[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ 熱伝達率 $h=10.0[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ とする。

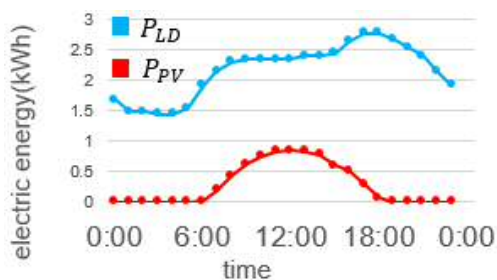


表 3.1 電気料金

	料金区分	単位	料金単価(円)
電力量料金	昼間(8AM~11PM)	1kWh	21
	夜間(11PM~8AM)	1kWh	10
契約電力料金		1kW	118.8

図 3.3 需要家負荷と太陽光発電電力

表 3.2 各種パラメータ

SOC 上限	90 [%]	蓄電池総表面積	0.77[m ²]	内部抵抗	0.5[Ω]
SOC 下限	10 [%]	空気の熱容量	84.5 [kJ/K]	蓄電池の熱容量	16 [kJ/K]
公称容量	3.6 [kWh]	刻み時間	3600[s]	初期容量	0.6 [kWh]
最大充電電力量	3.6 [kWh]	蓄電池電圧	51.2[V]	充放電効率	0.9
最大放電電力量	3.6 [kWh]	周囲温度下限	0 [K]	周囲温度上限	40 [K]

- ・シミュレーション結果

外気温度導入前後のシミュレーション結果を図 3.4 に示す。外気温度を導入することにより、周囲温度の上昇を抑制していることが分かる。また、買電量のグラフから外気温度導入後も蓄電池運用の最適化が行えていることが分かる。

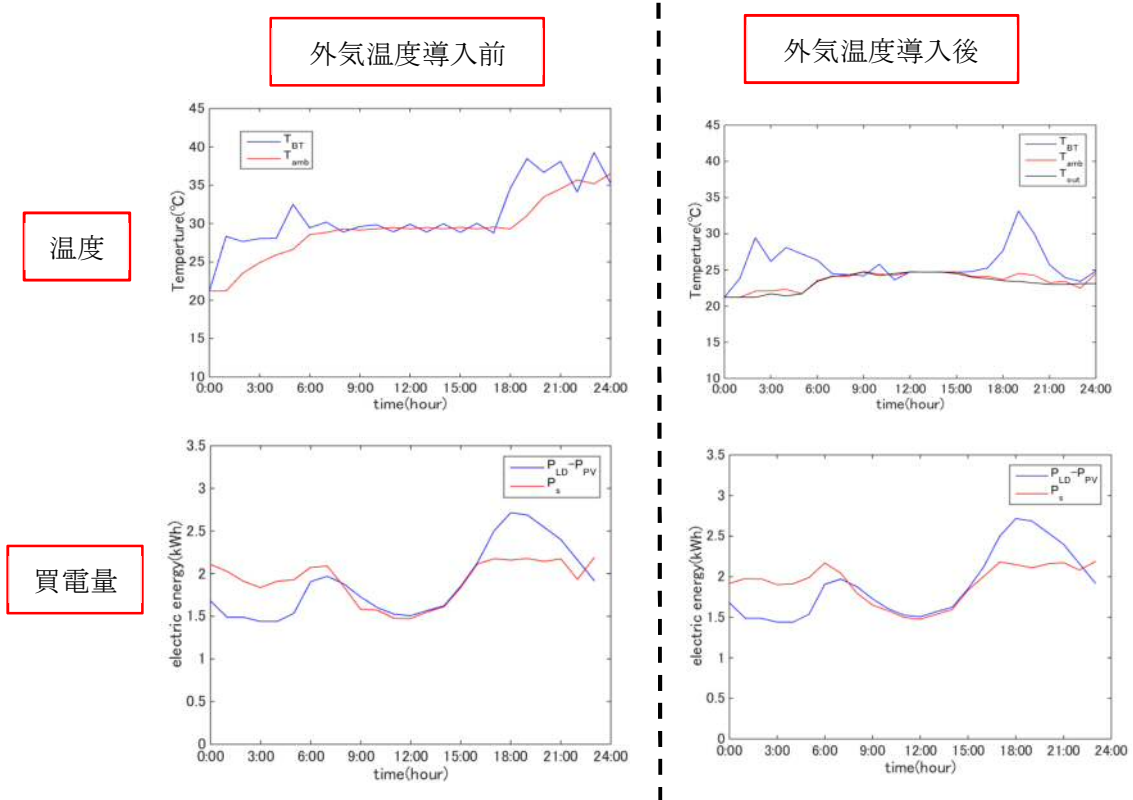


図 3.4 外気温度導入前後の比較

[常微分方程式の数値的解法の比較]

- ・シミュレーション条件

基本的なシミュレーション条件は表 3.2 となる。ただし、各解法を用いたときの温度の比較を容易にするために、部屋の体積を $48[m^3]$ に小さくし、温度の変化を大きくする。

- ・シミュレーション結果

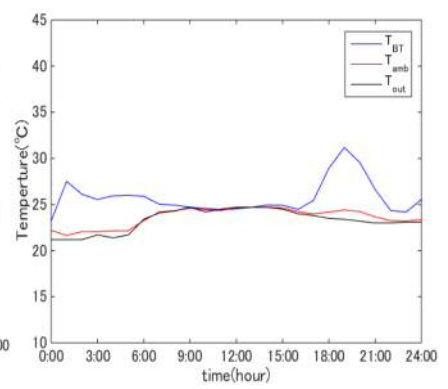
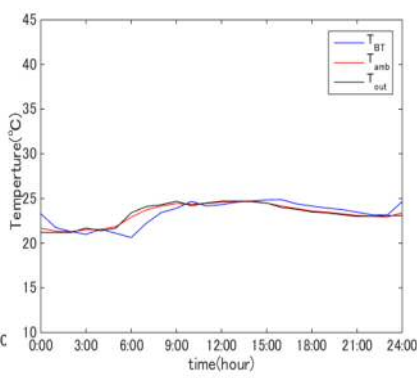
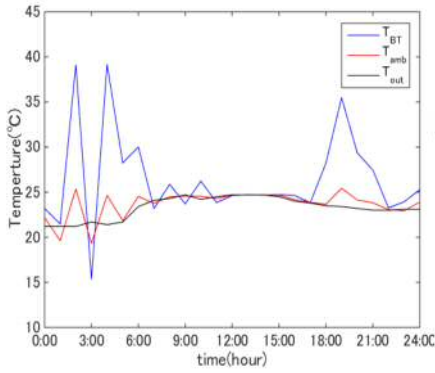
オイラー法、ルンゲクッタ法、台形法のシミュレーションの比較を行う。刻み時間は $3600[s]$ 、 $1800[s]$ 、 $600[s]$ の 3 パターンで行った。図 3.5 に温度のシミュレーション結果を示し、表 3.3 にシミュレーション時間と電気料金を示す。

オイラー法

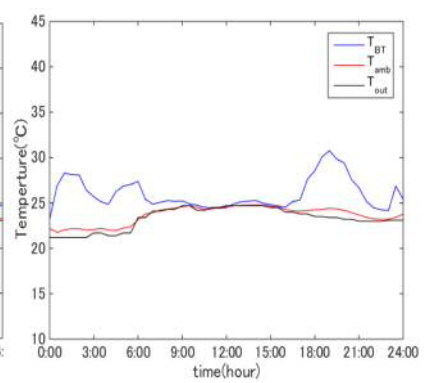
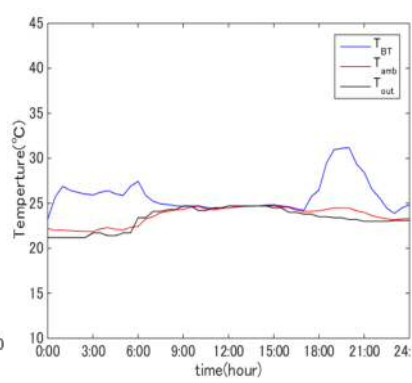
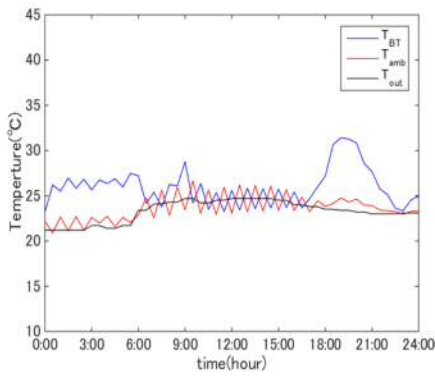
ルンゲクッタ法

台形法

3600s



1800s



600s

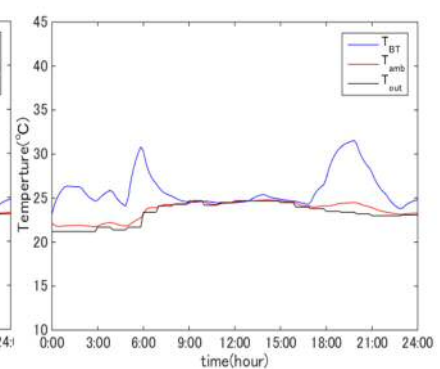
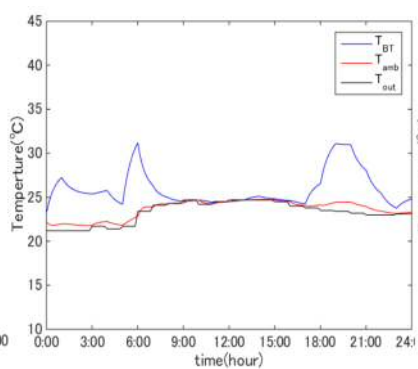
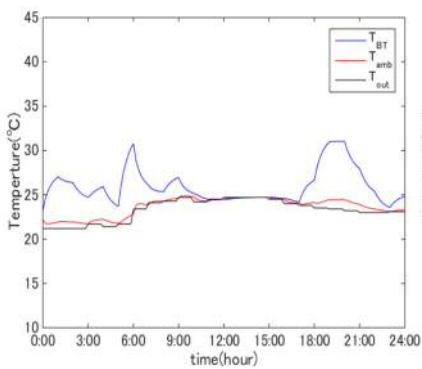


図 3.5 数値解法別の温度の結果

表 3.3 シミュレーション時間と電気料金

	オイラー法		ルンゲクッタ法		台形法	
	シミュレーション時間[s]	電気料金 [円]	シミュレーション時間[s]	電気料金 [円]	シミュレーション時間[s]	電気料金 [円]
3600[s]	2.4	773.43	—	—	1.5	773.43
1800[s]	2.2	773.43	5.0	773.43	1.9	773.43
600[s]	7.1	773.43	15.2	773.43	7.7	773.43

図 3.5 と表 3.3 より、3600s ではルンゲクッタ法は最適解を得ることができなかった。オイラー法では最適解は得られたが、温度が激しく振動していることが分かる。1800s ではオイラー法では微細な振動が残っており、その他の解法では精度の良い結果が得られた。600s では全ての解法で精度の良い結果が得られた。また、シミュレーション時間に関しては、どの刻み幅においてもオイラー法と台形法のシミュレーション時間はほぼ同じであり、ルンゲクッタ法はそれらの約 2 倍の時間がかかっていることが分かる。

以上より、シミュレーション時間及び精度の両方を考慮して、台形法を用いた場合の結果が最も良い結果であることが分かる。

[太陽光発電の余剰電力]

・シミュレーション条件

需要家負荷と太陽光発電電力を図 3.6 に示す。太陽光発電電力が需要家負荷を超え、余剰電力が発生するように設定している。また、売電単価は余剰買取の買取価格を参考にし、31 円と設定する。また、数値的解法は台形法を用い、その他の条件を表 3.4 に示す。ここで、 T_{out0} は外気初期温度である。

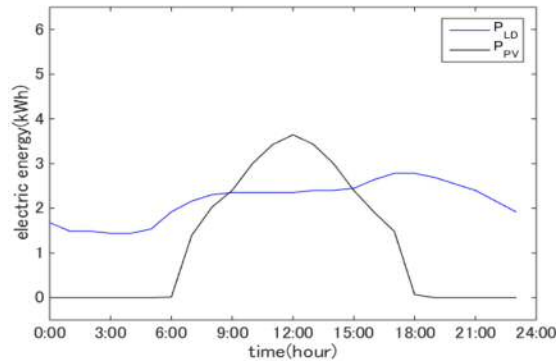


図 3.6 需要家負荷と太陽光発電電力

表 3.4 その他の条件

SOC 上限	90 [%]	蓄電池総表面積	0.77[m ²]	内部抵抗	0.5[Ω]
SOC 下限	10 [%]	空気の熱容量	56.3 [kJ/K]	蓄電池の熱容量	16 [kJ/K]
公称容量	3.6 [kWh]	刻み時間	600[s]	初期容量	0.6 [kWh]
最大充電電力量	3.6 [kWh]	蓄電池電圧	51.2[V]	充放電効率	0.9
最大放電電力量	3.6 [kWh]	周囲温度下限	40 [°C]	周囲温度上限	0 [°C]
熱貫流率	0.6[W/m ² K]	初期温度(蓄電池)	$T_{out0} + 2[°C]$	初期温度(周囲)	$T_{out0} + 1[°C]$

・シミュレーション結果

買電量と売電量を図 3.7、蓄電池の充放電量を図 3.8 に示す。図 3.7 において赤の破線が買電量、緑の破線が売電量である。また、図 3.8 において青の線が正の時は充電、負の時は放電である。

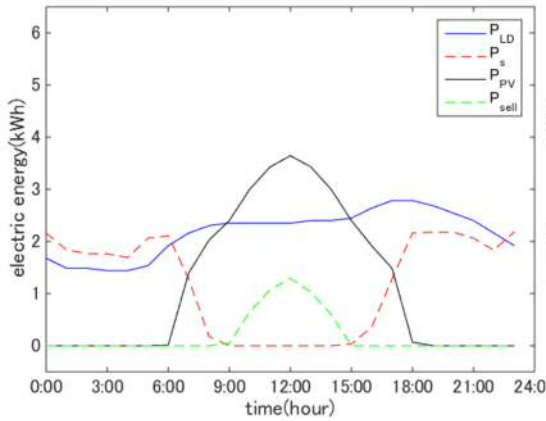


図 3.7 買電量と売電量

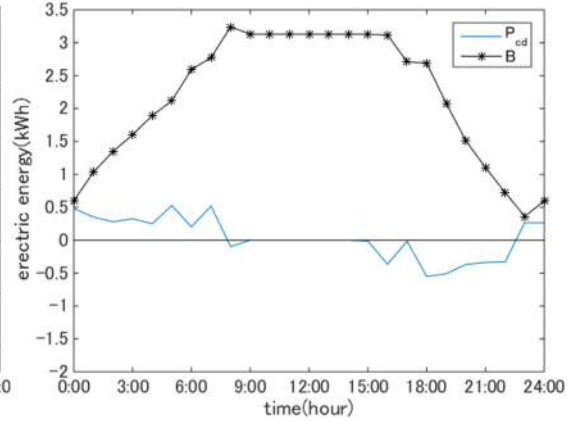


図 3.8 残存容量と充放電量

表 3.5 電気料金の比較

	電気料金(円)
太陽光出力小	773.43
太陽光出力大	289.15

結果より、余剰電力が発生している昼間に売電を行っていることが分かる。また、余剰電力の多い昼間の時間帯以外で蓄電池は放電していることが分かる。これらの余剰電力の売電と蓄電池運用によるピークシフトによって、電気料金が大幅に減少している。

[需要家負荷・太陽光発電出力を変えたシミュレーション]

様々な条件で現状のシステムが動作することを確認するために、需要家負荷パターンと太陽光発電パターンを変えたシミュレーションを行う。

・シミュレーション条件

需要家負荷は文献[3.1]を参考にして、ホテルと事務所の負荷パターンを設定し、太陽光発電出力は、晴、雨、曇の3パターンを想定して設定する。需要家負荷と太陽光出力を図 3.9、図 3.10 に示す。表 3.6 に示すように、合計6シナリオのシミュレーションを行う。また、その他の条件は表 3.4 の値を用いる。

表 3.6 シナリオ

シナリオ	需要家負荷	PV 出力
①	ホテル	晴
②	ホテル	曇
③	ホテル	雨
④	事務所	晴
⑤	事務所	曇
⑥	事務所	雨

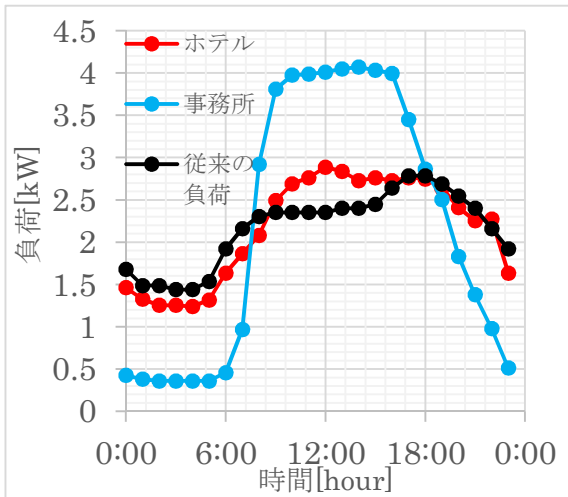


図 3.9 需要家負荷

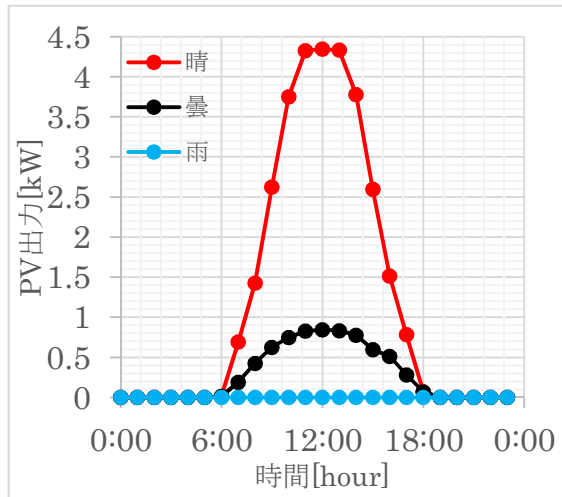


図 3.10 太陽光出力

・シミュレーション結果

それぞれのシナリオのシミュレーション結果を以下に示す。また、蓄電池と太陽光発電がない場合の電気料金も導出し、電気料金の比較を行う。

シナリオ①

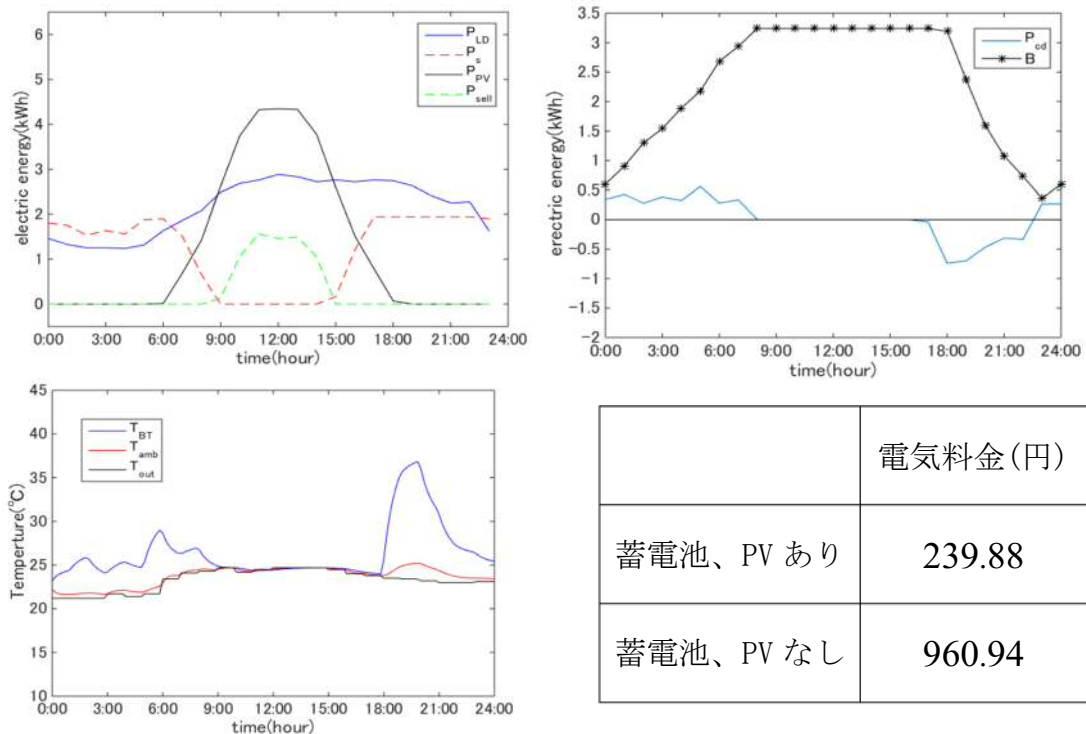


図 3.11 シナリオ①(左上:買電と売電 右上:充放電と残存容量 左下:温度)

シナリオ②

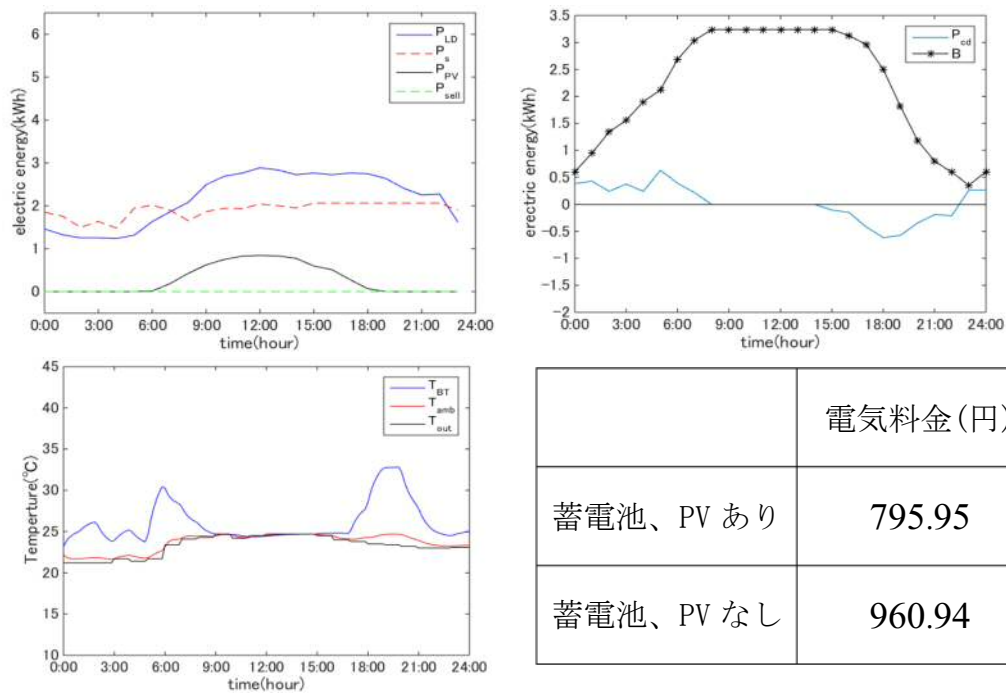


図 3.12 シナリオ②(左上:買電と売電 右上:充放電と残存容量 左下:温度)

シナリオ③

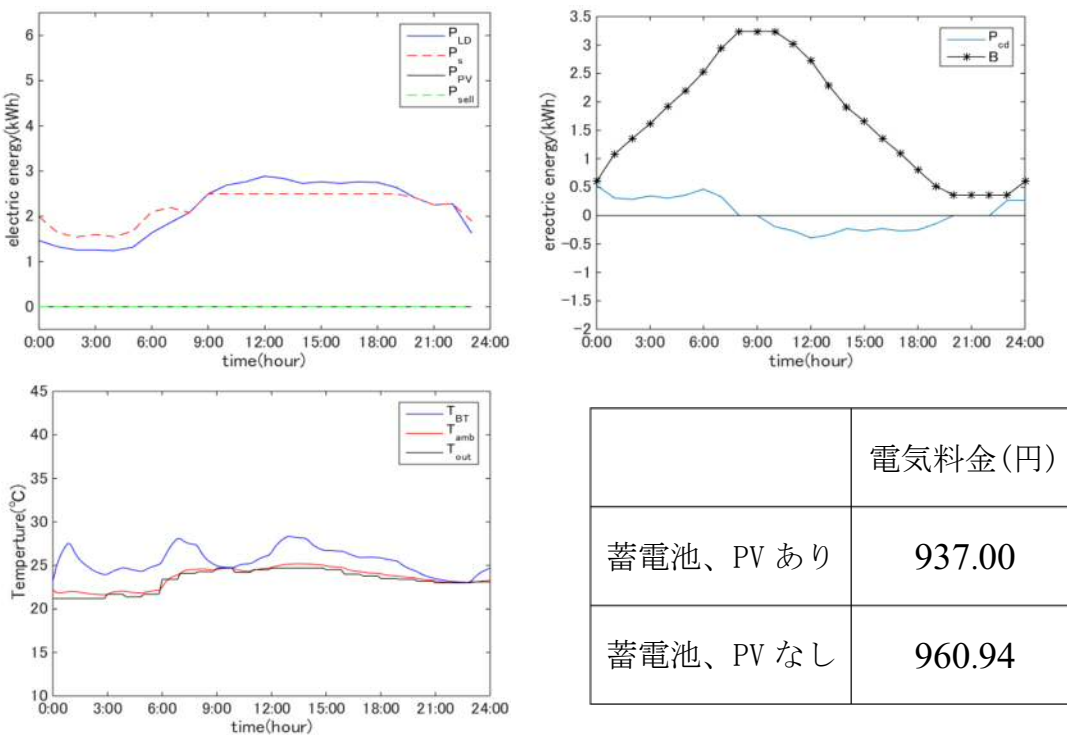
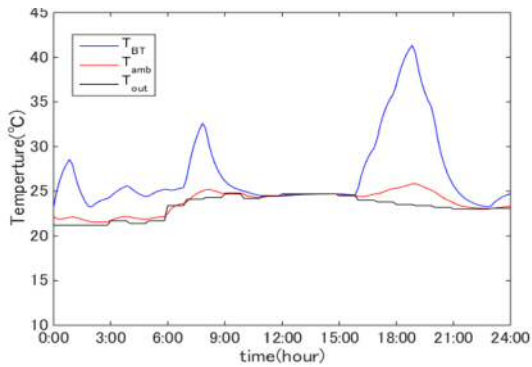
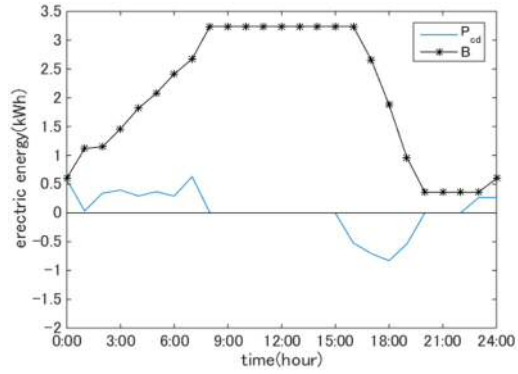
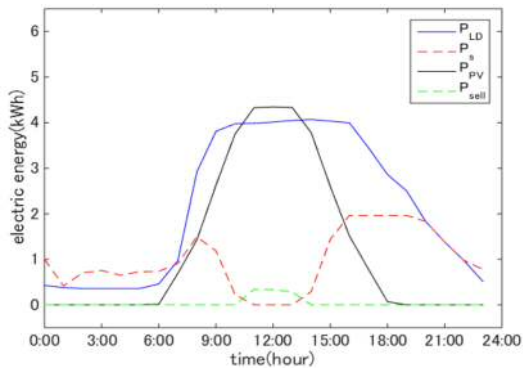


図 3.13 シナリオ③(左上:買電と売電 右上:充放電と残存容量 左下:温度)

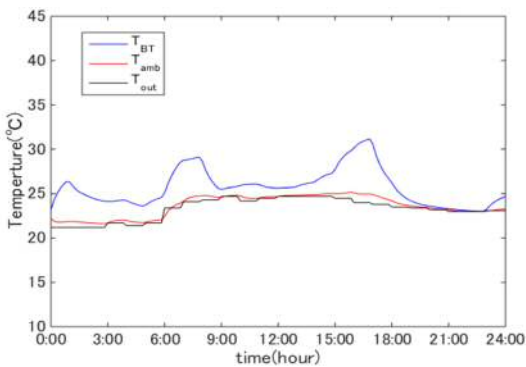
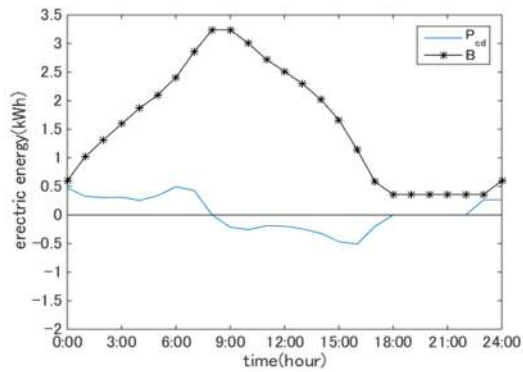
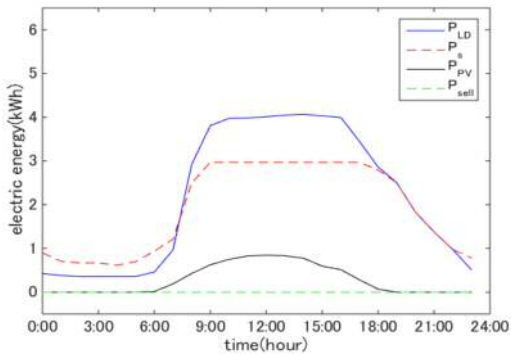
シナリオ④



	電気料金(円)
蓄電池、PV あり	394.76
蓄電池、PV なし	1062.25

図 3.14 シナリオ④(左上:買電と売電 右上:充放電と残存容量 左下:温度)

シナリオ⑤



	電気料金(円)
蓄電池、PV あり	896.21
蓄電池、PV なし	1062.25

図 3.15 シナリオ⑤(左上:買電と売電 右上:充放電と残存容量 左下:温度)

シナリオ⑥

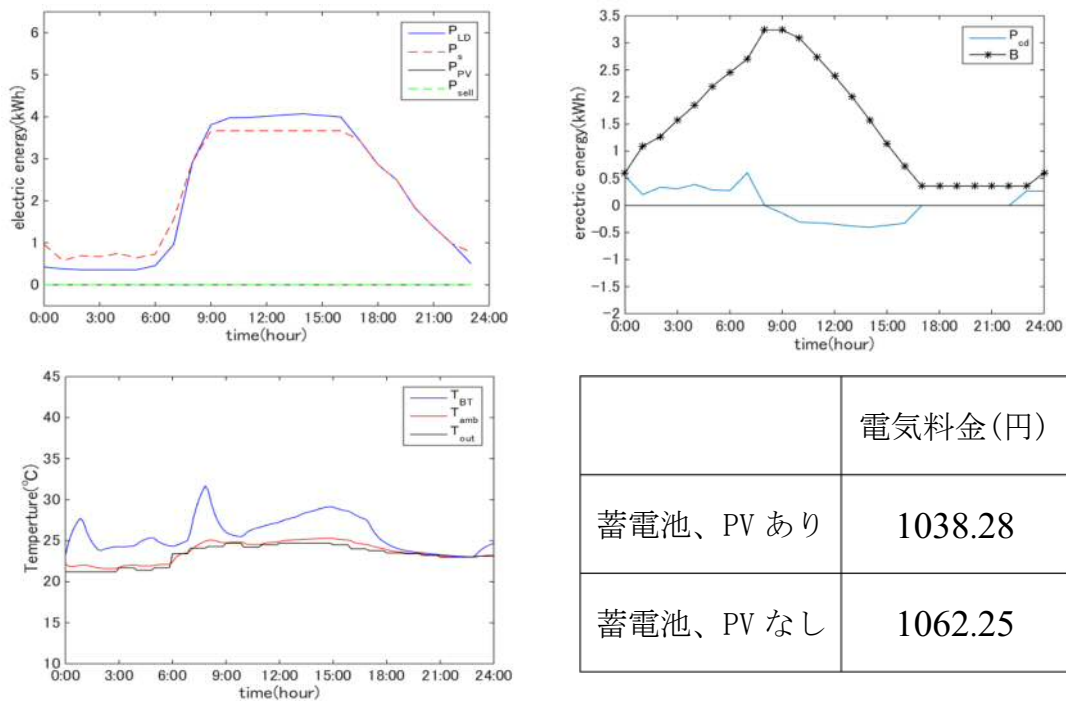


図 3.16 シナリオ⑥(左上:買電と売電 右上:充放電と残存容量 左下:温度)

結果より、全てのシナリオにおいて、正常に最適な電気料金を得ることができ、温度の振動なども得られなかった。また、全体的に昼間の負荷が大きい事務所の方がホテルよりも電気料金が高く、太陽光出力の少ない雨の方が電気料金が高いことが分かる。以上より、様々な需要家負荷、太陽光出力においても、太陽光発電とピークシフト、ピークカットを用いて、最適な電気料金を導出できることを確認できる。

3.5 考察とまとめ

本稿では、より現実的に近い環境でシミュレーションを行うために、外気温度の導入と太陽光発電の余剰電力の売電を定式化し、シミュレーションにより、妥当な結果を得ることができた。また、シミュレーション時間の短縮と精度向上を目的として、常微分方程式の数値解法の比較を行った。その結果、台形法を用いた場合に時間と精度ともに良い結果が得られた。最後に、様々な需要家負荷と太陽光出力の条件におけるシミュレーションを行い、現状のシステムが対応できることを確認した。

第4章 蓄電池寿命特性を考慮した HEMS 最適運用計画

EMS において重要な役割を担っている BT の代表的な特性として、温度特性の他に寿命特性がある。一般に、BT の SOC(State of Charge)や充放電サイクル数の影響を受けて、BT の寿命は変化する。そこで、本章では、カレンダー寿命とサイクル寿命特性を用いて、寿命劣化を抑制する制約を定義する。そして、温度特性及び寿命特性を考慮した BT の最適運用計画を提案する。

4.1 需要家モデル及び温度モデル

対象とする需要家及び温度モデルを図 4.1 に示す。需要家モデルについて、需要家は一般電気事業者からの調達、PV、BT により、自らの電力負荷に対して経済的に電力消費できるようなシステム構成とする。そのため、PV 余剰電力は系統へ売電する。次に、温度モデルについて、BT の周囲温度 $T_{amb}[K]$ と BT 温度 $T_{BT}[K]$ は、外気温度 $T_{out}[K]$ や BT の充放電に伴う発熱によって変化する。図 4.1 のモデルについて、BT の使用温度範囲を満足しつつ、電気料金が低くなるように BT の最適運用を考える。

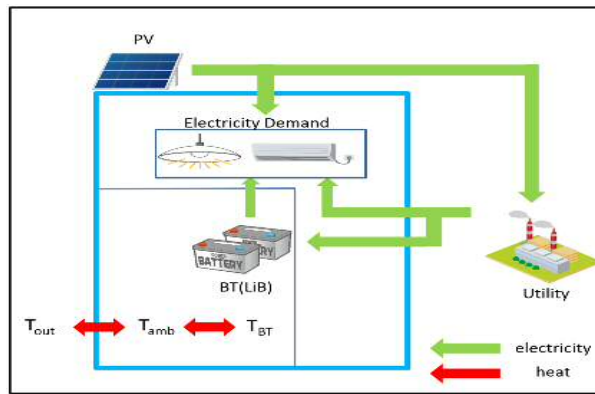


図 4.1 需要家及び温度モデル

4.2 温度制約

一般的に、BT の発熱要因は、電池のエントロピー変化（電池内部で起こる分子間の乱雑な変化）に起因するエントロピー発熱と、ジュール発熱（電池の内部抵抗に依る）が主要因となる。しかし、実際にはエントロピー発熱はジュール発熱に比べて非常に小さい。よって、本稿では BT 充放電による発熱は、ジュール発熱のみから成ると仮定する。

ジュール発熱 Q_j [W] は(4.1)式で表される。

$$Q_j(t) = I^2(t) \cdot R \dots\dots\dots (4.1)$$

BT と部屋の空気間の熱移動量 Q_d [W] は(4.2)式で表される。

$$Q_d(t) = h \cdot A(T_{BT}(t) - T_{amb}(t)) \dots\dots\dots (4.2)$$

部屋の空気と外気間の熱移動量 Q_w [W] は(4.3)式で表される。

$$Q_w(t) = K \cdot S(T_{out}(t) - T_{amb}(t)) \dots\dots\dots (4.3)$$

(4.1)、(4.2)、(4.3)式を用いると、BT 温度及び周囲温度の熱収支式は、それぞれ(4.4)式、(4.5)式で表される。

$$C_{BT} \frac{\partial T_{BT}(t)}{\partial t} = Q_j(t) - Q_d(t) \dots\dots\dots (4.4)$$

$$C_{amb} \frac{\partial T_{amb}(t)}{\partial t} = Q_d(t) + Q_w(t) \dots\dots\dots (4.5)$$

(4.4)、(4.5)式を微分方程式の数値解法を用いて近似し、使用温度範囲に関わる温度制約として制約条件に導入する。本稿では、比較的大きな刻み時間で精度の良い結果が得られる台形法を用いる。台形法を用いた一般的な微分方程式の近似を(4.6)式に示す。温度初期値と(4.6)式を用いて、(4.7)~(4.10)式の BT と周囲温度に関する制約を定義する。

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= f(x,t) \\ x_{n+1} &= x_n + \frac{1}{2} \{f(x_n, t_n) + f(x_{n+1}, t_{n+1})\} \Delta t \end{aligned} \dots\dots\dots (4.6)$$

【BT 使用温度範囲制約】

$$T_{amb}^l \leq T_{amb}(t) \leq T_{amb}^u \dots\dots\dots (4.7)$$

【BT 温度に関する制約】

$$T_{BT}(t+1) \geq T_{BT}(t) + \frac{D}{2} \{f_1(t) + f_1(t+1)\} \dots\dots\dots (4.8)$$

$$\text{ただし、 } I(t) = \frac{(P_c(t) + P_d(t)) \times 10^3}{V} \text{、 } f_1(t) = \frac{Q_j(t) - Q_d(t)}{C_{BT}}$$

不等号を用いて定義することで、制約条件を凸制約として定義することができる。この結果、混合二次制約(MIQCP)を用いて最適化を実行でき、充放電切り替え数をカウントするために 0-1 変数を用いることができる。

【周囲温度に関する制約】

$$T_{amb}(t+1) = T_{amb}(t) + \frac{D}{2} \{f_2(t) + f_2(t+1)\} \dots\dots\dots (4.9)$$

$$\text{ただし、 } f_2(t) = \frac{Q_d(t) + Q_w(t)}{C_{amb}}$$

【初期温度の設定】

$$T_{BT}(1) = T_{BT}^0, T_{amb}(1) = T_{amb}^0 \dots\dots\dots (4.10)$$

4.3 寿命劣化抑制制約

○カレンダー寿命

カレンダー寿命は、BT を長年放置した際の経年劣化に起因するものである。一般的に、SOC が高い状態で保存すると BT のカレンダー寿命特性により、BT の寿命劣化が加速する。そこで、BT の保存劣化による最大容量の減少を反映させるための制約を定義する。図 4.2 に示すように、本稿では、時間経過とともに BT 最大容量が減少し、運用範囲も変化するものとして定義する。

【BT 最大容量の決定】

$$B_m(t+1) = B_m(t) - \alpha_{ca}(\sqrt{t} - \sqrt{t-1})B(t) \dots\dots\dots (4.11)$$

【残存容量上下限制約】

$$\alpha_l \cdot B_m(t) \leq B(t) \leq \alpha_u \cdot B_m(t) \dots\dots\dots (4.12)$$

【初期最大容量の設定】

$$B_m(1) = B_{max} \dots\dots\dots (4.13)$$

ここで、 α_u, α_l : BT の残存容量上下限率、 $B_m(t)$: 時刻 t における BT 最大容量 [kWh]、 a_{ca} : 保存劣化係数である。

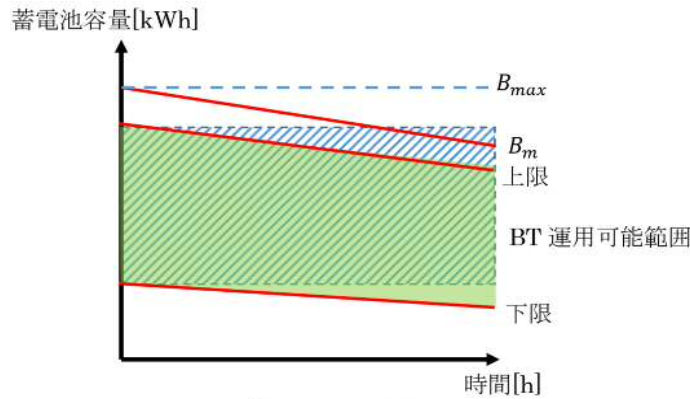


図 4.2 BT 最大容量の減少

○サイクル寿命

サイクル寿命は、BT の充放電回数に起因するものである。充放電サイクル数をカウントするために、文献[4.1]を参考に、0-1 変数を用いて定義する。まず、(4.14)式のように、BT 残存容量の増減で充電または放電状態を判断する。(4.15)、(4.16)式は、(4.14)式の if 文を非常に大きい定数 M を用いて表した式である。次に、 dif^c 、 dif^d に対して、充放電無しの状態に前の時刻の状態を引き継ぐように変換した変数 cm 、 dm を(4.17)~(4.19)式で定義する。そして、(4.20)、(4.21)式で充放電の切り替え数をカウントする変数 sw を定義し、(4.22)式で切り替え数上限を設定する。

【充放電状態を表す dif^c 、 dif^d 】

$$dif^c(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } B(t) > B(t-1) \\ 0 & \text{else} \end{cases}, \quad dif^d(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } B(t) < B(t-1) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \dots\dots\dots (4.14)$$

$$\begin{aligned} B(t) - B(t-1) &> M(dif^c(t) - 1) \\ B(t) - B(t-1) &\leq M dif^c(t) \end{aligned} \dots\dots\dots (4.15)$$

$$\begin{aligned} B(t) - B(t-1) &< M(1 - dif^d(t)) \\ B(t) - B(t-1) &\geq -M dif^d(t) \end{aligned} \dots\dots\dots (4.16)$$

【充放電無しの状態に前の時刻の状態を引き継ぐ cm 、 dm 】

$$cm(t) \geq dif^c(t), \quad dm(t) \geq dif^d(t) \dots\dots\dots (4.17)$$

$$cm(t) \geq cm(t-1) - dif^d(t), \quad dm(t) \geq dm(t-1) - dif^c(t) \dots\dots\dots (4.18)$$

$$cm(t) + dm(t) = 1 \dots\dots\dots (4.19)$$

【充放電の切り替えをカウント sw 】

$$sw(t) \geq cm(t) - cm(t-1) \dots\dots\dots (4.20)$$

$$sw(t) \geq dm(t) - dm(t-1) \dots\dots\dots (4.21)$$

【充放電切り替え数の制限】

$$\sum_{t=1}^{24} sw(t) \leq N \dots\dots\dots (4.22)$$

ここで、 M :非常に大きな定数、 N :充放電切り替え数上限である。

また、サイクル寿命特性によって減少する BT 最大容量は、サイクル数によって(4.23)式で定義される。ここで、カレンダー寿命劣化では毎時刻、BT 最大容量を更新していたが、サイクル寿命劣化は、1日毎に BT 最大容量を更新する。そのため、最適化計算終了後に BT 最大容量を更新する。これは、(4.23)式は平方根の中に変数が含まれており、混合二次制約(MIQCP)で計算することができないためである。

【サイクル寿命劣化】

$$B_{m-s}^{day+1} = B_{m-e}^{day} - a_{cy} (\sqrt{cycle_e^{day}} - \sqrt{cycle_s^{day}}) B_{m-s}^{day} \dots\dots\dots (4.23)$$

ここで、 B_{m-s}^{day+1} :翌日の初期 BT 最大容量 [kWh]、 B_{m-e}^{day} :当日の最終 BT 最大容量 [kWh]、 a_{cy} :サイクル劣化係数、 $cycle_e^{day}$:当日の最終サイクル数、 $cycle_s^{day}$:当日の初期サイクル数、 B_{m-s}^{day} :当日の初期 BT 最大容量[kWh]である。

4.4 最適運用計画の定式化

○目的関数

図 4.1 のモデルに対して、(4.24)式のような目的関数を用いて、需要家の電気料金 Cost の最小化を行う。

$$\text{Minimize } Cost = \sum_{t=1}^{24} (c(t) \cdot P_s(t) - c_{PV} \cdot P_{sell}(t)) + c_{pd} \cdot P_s^{max} \dots\dots\dots (4.24)$$

○制約条件

【需給バランス制約】

$$P_s(t) = P_{LD}(t) - P_{PV}(t) + P_c(t) - P_d(t) + P_{sell}(t) \dots\dots\dots (4.25)$$

【BT 充放電出力上下限制約】

$$0 \leq P_c(t) \leq P_c^{max}, 0 \leq P_d(t) \leq P_d^{max} \dots\dots\dots (4.26)$$

【契約電力上限制約】

$$P_s(t) \leq P_s^{max} \dots\dots\dots (4.27)$$

【BT 充放電電力量の差分方程式】

$$B(t+1) = B(t) + \eta \cdot P_c(t) - \frac{1}{\eta} \cdot P_d(t) \dots\dots\dots (4.28)$$

【残存容量境界制約】

$$B(1) = B(25) = B_{inl} \dots\dots\dots (4.29)$$

上記の制約式に加えて温度制約及び寿命劣化抑制制約を導入し、温度特性及び寿命特性を考慮した BT 最適運用計画の制約条件とする。

4.5 シミュレーション

4.5.1 温度特性と寿命特性導入後の比較

温度特性と寿命特性導入による変化の確認を容易にするため、表 4.1 に示す 3 つのパターンについてシミュレーションを行う。そして、それぞれのパターンで温度特性と寿命特性導入前後のシミュレーションを比較する。

○シミュレーション条件

需要家負荷は昼から夕方にかけて消費量の多いデータを使用し、PV 出力は晴を想定したデータを用いる。需要家負荷と PV 出力を図 4.3 に示す。また、表 4.2 には、温度上昇の大小それぞれのパラメータを記述している。その他の主なパラメータを表 4.3 に示す。これらの条件のもと、比較的精度の良い cplex の混合整数二次制約(MIQCP)を用いて、1 日の電気料金を最小にする BT 最適運用計画を求める。

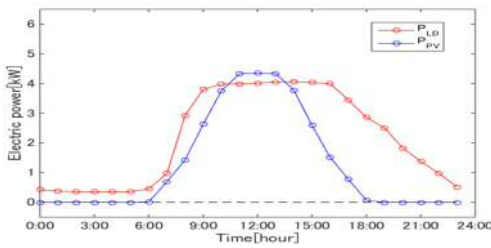


図 4.3 需要家負荷と PV 出力

表 4.1 各種パターン

	温度上昇	切り替え数上限
パターン 1-1	小	10
パターン 1-2	大	10
パターン 1-3	大	1

表 4.2 温度上昇別パラメータ

	熱貫流率 [W/m ² ·K]	部屋の体積 [m ³]	外気温 [°C]	内部抵抗 [Ω]	熱伝達係数 [W/m ² ·K]	初期温度 [°C]
温度上昇小	0.6	48	20~25	0.59	20	22.2
温度上昇大	0.2	2.2	30~35	0.65	10	32.2

表 4.3 その他パラメータ

SOC 上限	90 [%]	蓄電池総表面積	0.77[m ²]	蓄電池の熱容量	25[kJ/K]
SOC 下限	10 [%]	刻み時間	600[s]	初期容量	0.6 [kWh]
公称容量	3.6 [kWh]	蓄電池電圧	51.2[V]	充放電効率	0.9
最大充電電力量	3.6 [kWh]	周囲温度上限	40 [°C]	周囲温度下限	0 [°C]
最大放電電力量	3.6 [kWh]				

○シミュレーション結果

・パターン 1-1

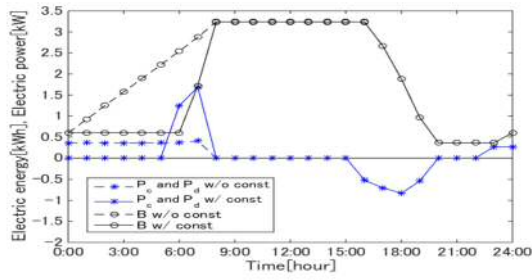


図 4.4 残存容量と充放電(パターン 1-1)

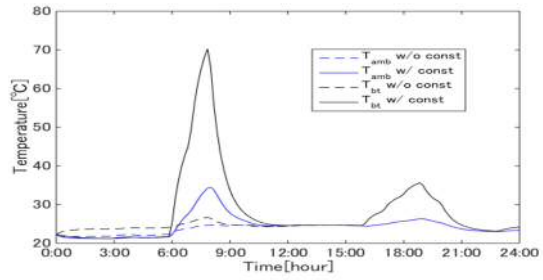


図 4.5 温度(パターン 1-1)

・パターン 1-2

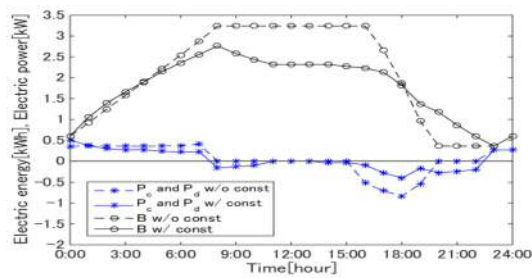


図 4.6 残存容量と充放電(パターン 1-2)

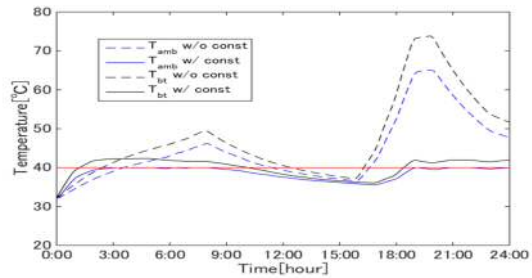


図 4.7 温度(パターン 1-2)

・パターン 1-3

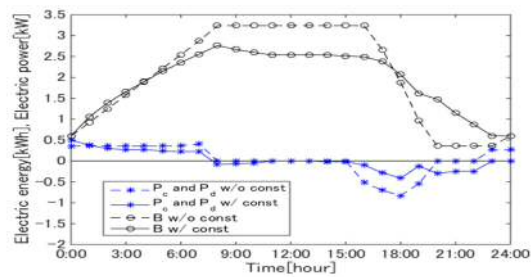


図 4.8 残存容量と充放電(パターン 1-3)

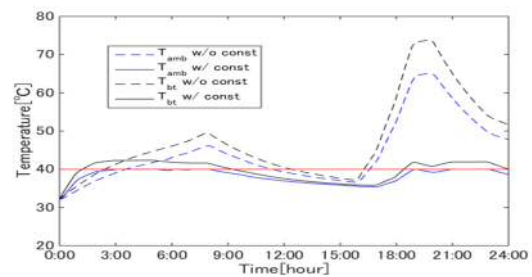


図 4.9 温度(パターン 1-3)

表 4.4 電気料金

	基本[円]	電力量[円]	売電[円]	合計[円]
制約無し	7.52	416.95	29.72	394.75
パターン 1-1	7.53	416.96	29.72	394.77
パターン 1-2	9.15	420.68	29.72	400.11
パターン 1-3	9.13	422.55	29.72	401.96

4.5.2 考察とまとめ

・パターン 1-1

BTの残存容量を図4.4、温度を図4.5に示す。それぞれの図における制約無しの結果は、温度特性と寿命特性の両方を考慮しない場合の結果である。図4.4より、カレンダー寿命特性による劣化を抑制するために、高SOCの滞在時間が減少していることが分かる。表4.4の電気料金を比較すると、制約有りの方の電気料金がわずかに増加している。これは、カレンダー寿命特性によって、BT最大容量が減少したためであると考えられる。

・パターン 1-2

BTの残存容量を図4.6、温度を図4.7に示す。図4.6より、制約無しの場合は夕方まとめて放電しているが、制約有りの場合は昼間から徐々に放電している。これは、放電の時間帯を分散させ、温度上昇を抑制するためである。また、BTの総充放電量もわずかに減少しており、温度上昇を抑制している。実際に図4.7の温度を比較すると、温度制約により、使用温度範囲内で運用できていることが分かる。次に、表4.4の電気料金から、制約無しよりも電気料金が增加している。これは、BT運用パターンの変化によるピークカットの減少と総充放電量の減少によるピークシフトの減少のためである。

・パターン 1-3

BTの残存容量を図4.8、温度を図4.9に示す。図4.8より、パターン1-2と同様に、温度上昇を抑制するために、ピークカット及びピークシフトが減少している。また、充放電切り替え数上限を1回に制限しているため、深夜の放電→充電の切り替えが行われていないことが分かる。表4.4の電気料金より、温度制約に加えて充放電切り替え数の制限もあるため、パターン1-2の電気料金よりもさらに増加していることが分かる。

4.5.3 長期間のシミュレーション

○シミュレーション条件

基本的には、4.5.1章のパターン1-3の条件のもと反復計算を行うことで、長期間のシミュレーションを行う。よって、同じ需要家負荷やPV出力といった条件で繰り返し計算を行うことで、長期間のシミュレーションとする。ただし、寿命劣化による運用計画の変化を容易に確認できるようにするために、温度制約は考慮しないものとする。

反復計算を行う際のシミュレーションフローを図 4.10 に示す。図 4.10 について、 CDR_u は容量劣化率上限、 day_u は経過日数上限である。まず、1日の最適化計算実行後にサイクル特性による寿命劣化を反映することで、BT最大容量が劣化する。その後、容量劣化率または経過日数で終了条件を判別する。容量劣化率が容量劣化率上限を超える、または経過日数が経過日数上限を超えることでシミュレーションは終了する。

今回は、表 4.5 の 2 パターンでシミュレーションを行い、BT 運用や BT 最大容量の変化を確認する。また、終了条件の基準は表 4.6 とする。

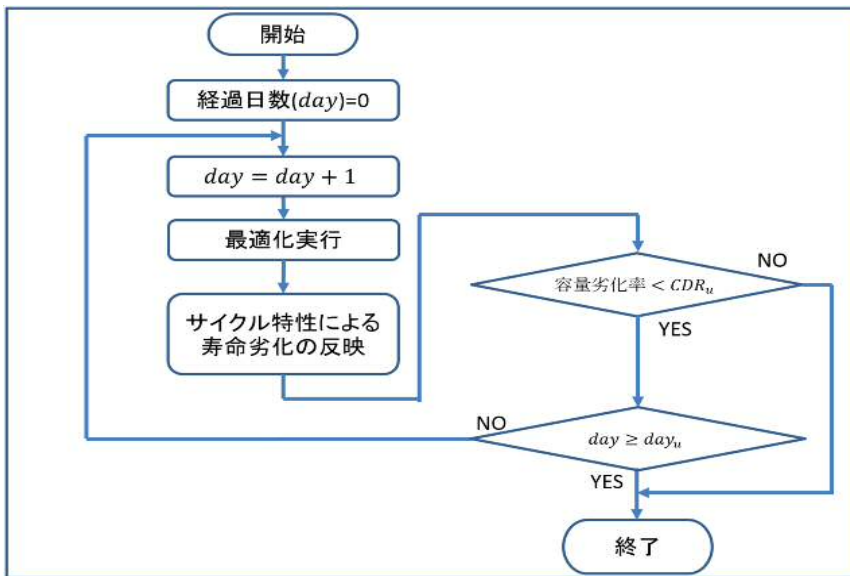


図 4.10 シミュレーションフロー

表 4.5 各種パターン

	初期容量[kWh]
パターン 2-1	0.6
パターン 2-2	1.5

表 4.6 終了条件

容量劣化率上限	5%
経過日数上限	3650 日

○シミュレーション結果

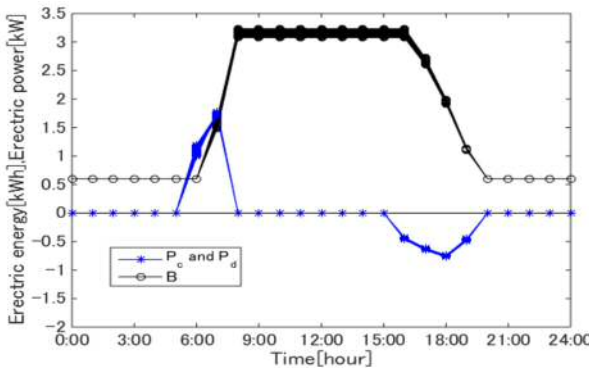


図 4.11 残存容量と充放電(パターン 2-1)

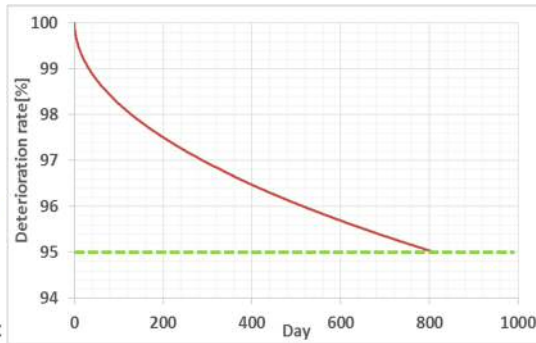


図 4.12 BT 最大容量劣化(パターン 2-1)

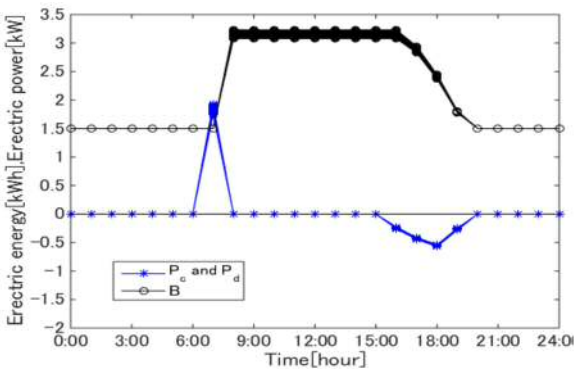


図 4.13 残存容量と充放電(パターン 2-2)

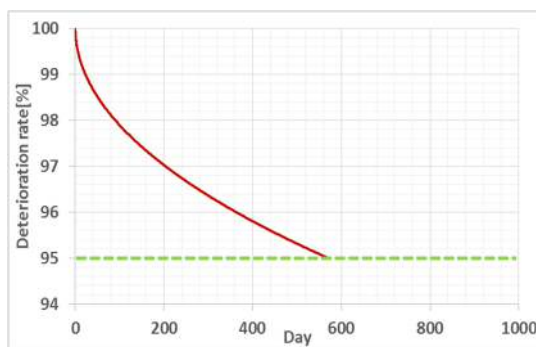


図 4.14 BT 最大容量劣化(パターン 2-2)

4.5.4 考察とまとめ

まず、図 4.11 と図 4.13 を比較すると、パターン 2-1 とパターン 2-2 で初期容量の違いによる BT 運用計画または残存容量の変化が確認できる。また、どちらのパターンも日数経過により、昼間の残存容量が徐々に減少していることが分かる。これは、サイクル寿命劣化によって、BT 最大容量が減少するためと考えられる。

実際に、図 4.12 と図 4.14 を比較すると、どちらのパターンも日数経過により、BT 最大容量が減少していることが分かる。ここで、BT 最大容量は、サイクル数に対して平方根的に減少している。よって、BT の寿命劣化は、保存日数またはサイクル数の平方根と直線関係をもっており、今回のシミュレーション結果が妥当な結果であることが分かる。また、パターン 2-1 とパターン 2-2 の容量劣化率上限到達日に着目すると、パターン 2-2 の方が、容量劣化率上限に早く到達していることが分かる。これは、パターン 2-2 は初期容量を高く設定しており、そのため、1 日の最終残存容量も高くなる。よって、パターン 2-1 よりも SOC が高い状態で日々の運用を行っていることになり、カレンダー寿命劣化の影響を大きく受けることで、寿命劣化が加速したと考えられる。今回のシミュレーション条件では検証してないが、サイクル数の違いなどによっても、容量劣化率上限到達日は変化すると考えられる。

第5章 MATLAB/Simulink を用いた HEMS の最適制御に関する研究

本研究では、太陽光発電（PV）や蓄電池（BT）を有するマイクログリッドを様々な条件下で最適に制御する手法について検討する。本研究の制御対象は、例として、図5.1に示す広島大学実験研究棟の実験設備を想定している。最適な制御手法の開発のために、まず、図5.1の設備仕様に合わせたシミュレーションモデルを、MATLAB/Simulink SimPowerSystems上で作成する。次に、PVの発電量、蓄電池の充電容量、そして負荷需要などの実データを入力とした需給シミュレーションを行う。最後に、定量的な評価を行うとともに最適制御手法の検討を行う。

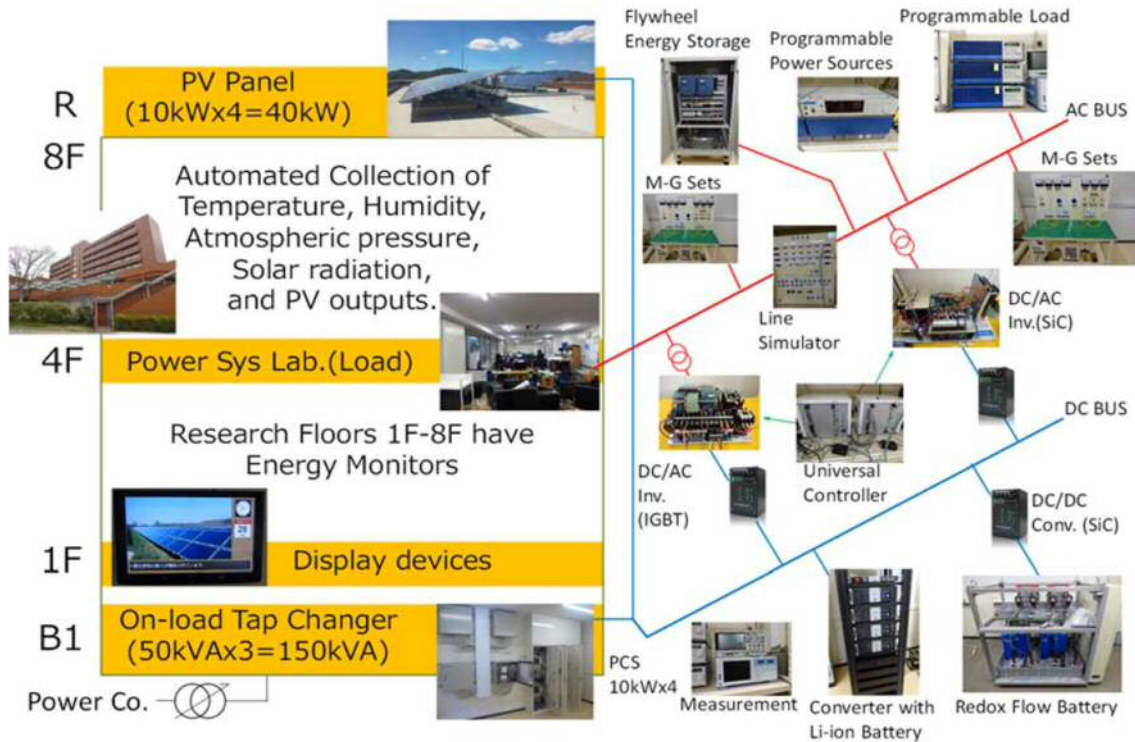


図5.1 広島大学実験研究棟実験設備（制御対象例）

5.1 シミュレーションモデル

図5.1に示した実験研究棟の一部を模擬したシミュレーションモデルを図5.2に示す。シミュレーションにおける諸元は下記に示すとおりである。

- ・PVパネル

日射量：1000[W/m²]一定、セル温度：25[°C]一定、開放電圧：29.7[V/module]
 短絡電流：8.6[A/module]、直列接続数：11[個/string]、並列ストリング数：4[個]

- ・リチウムイオン蓄電池（LiB）

出力容量：1.2[kWh/個]、SOC初期値：60[%]、公称電圧：51.2[V]
 定格放電電流：17.4[A/個]、並列接続数：3[個]

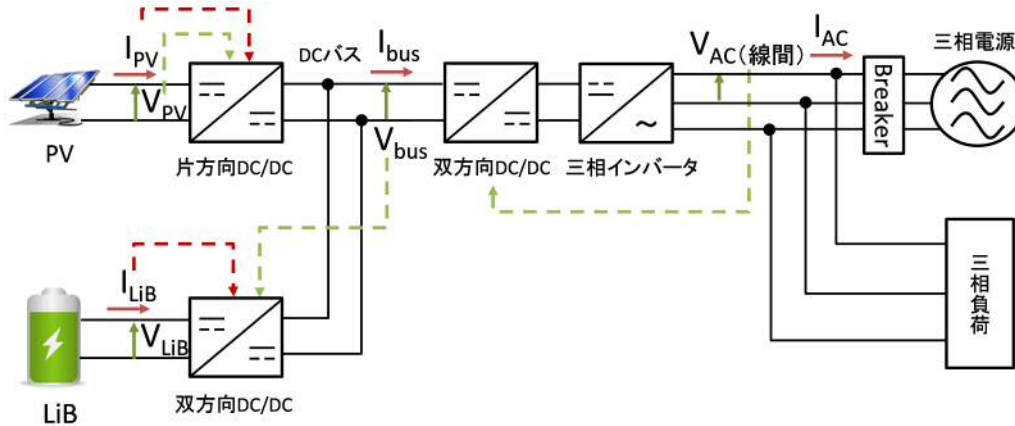


図5.2 シミュレーションモデル

【PV モデル】

PV は電流源であると考え、日射量[W/m²]とセル温度[°C]を設定することで、電流-電圧(I-V)特性曲線が得られるようにモデル化した。本モデルでは、この I-V 特性曲線と、負荷の大きさに従って出力が決定される。また、本モデルは、片方向 DC/DC コンバータを介して蓄電池と共通の直流母線（DC バス）に接続される。市販のパワーコンディショナと同様に、最大電力点（Maximum Power Point Tracking: MPPT）が制御されるように設計している。

本研究では、MPPT 制御として増分コンダクタンス法を用いている。増分コンダクタンス法は PV の P-V 特性曲線の傾きが最大電力点で 0 になるという特性を利用した制御手法である。式で表すと次式のようになる。

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで、 P は PV の出力電力、 V は PV の出力電圧、 I は PV の出力電流である。(5.1) 式の関係式で傾きが 0 ということは (5.2) 式で示すようになる。

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \dots\dots\dots (5.2)$$

このとき、 $\frac{dI}{dV}$ を増分コンダクタンス、 $\frac{I}{V}$ を瞬時コンダクタンスという。増分コンダクタンスと瞬時コンダクタンスの比較により、動作電圧を決定する。すなわち、表 5.1 に示す 3 パターンの比較を行う。

表 5.1 増分コンダクタンスと瞬時コンダクタンスの比較

傾き	正	負	0 (最大電力点)
増分コンダクタンスと瞬時コンダクタンスの比較	$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$	$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$	$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$

表 5.1 より、傾きが 0 のときに動作電圧を一定に保ち、正の時は動作電圧を上げ、負の時は動作電圧を下げるよう PV 用片方向 DC/DC コンバータを制御する。

【LiB モデル】

LiB は電圧源であると考え、温度特性を考慮できるモデルを使用する (すでにツール MATLAB/Simulink に蓄電池モデルが用意されている)。この蓄電池は、双方向 DC/DC コンバータを介して PV と共通の DC バスに接続される。この理由として、今後導入が予想される DC 負荷を、電圧が安定に維持される DC バスに、柔軟に接続できるようにするためである。また、蓄電池の制御方法として、DC バス電圧 V_{bus} を指令値 400[V] に維持し、システム全体の電力バランスを維持するように設計した。すなわち、LiB の充放電電流 I_{LiB} を制御することになる。LiB 用双方向 DC/DC コンバータの制御ブロックを図 5.3 に示す。

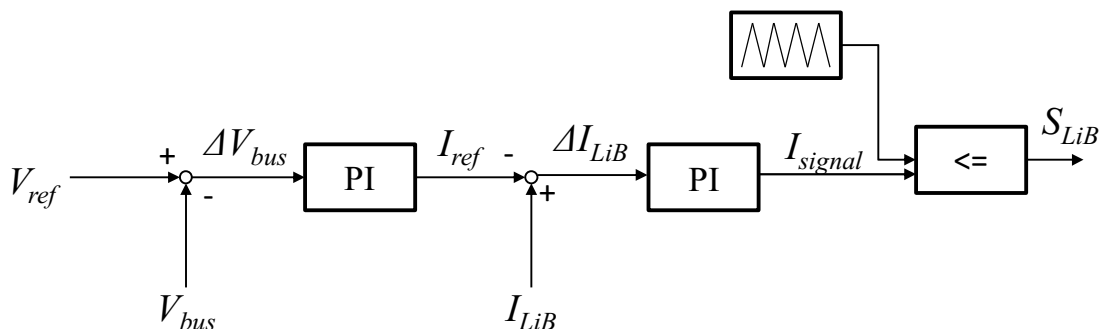


図 5.3 DC バス電圧制御ブロック

ここで、 V_{bus} は DC バス電圧の測定値、 V_{ref} は DC バス電圧の指令値、 I_{LiB} は LiB の充放電電流の測定値、 I_{ref} は LiB の充放電電流の指令値、 d_{ref} は双方向 DC/DC コンバータの duty 比、 S_{bi} は双方向 DC/DC コンバータの動作信号である。

【DC/AC コンバータ】

DC/AC コンバータは、片方向 DC/DC コンバータと三相インバータから構成される。片方向 DC/DC コンバータは三相インバータの出力電圧 V_{AC} を指令値 200[V] になるように電圧を制御する。また、本シミュレーションモデルを系統連系させる際には、上記の電圧制御に加えて、三相インバータの電力を制御することで系統連系後も安定的に動作させることが可能となっている。電圧制御ブロックと電力制御ブロックをそれぞれ図 5.4、図 5.5 に示す。

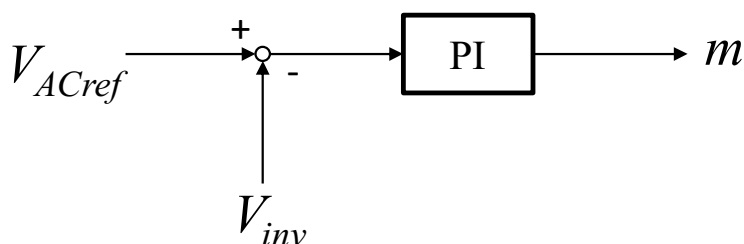


図 5.4 三相インバータ電圧制御ブロック

ここで、 V_{inv} は三相インバータの出力電圧の測定値 (実効値)、 V_{ACref} は三相インバータの出力電圧の指令値 (実効値)、 m は三相インバータの変調率である。

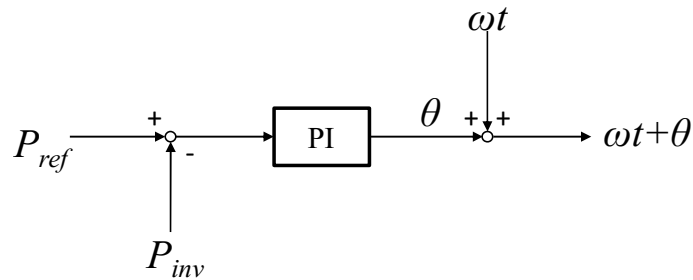


図 5.5 三相インバータ電力制御ブロック

ここで、 P_{inv} は三相インバータの測定電力、 P_{ref} は三相インバータの指令電力、 θ は三相インバータ内部の位相角、そして ωt は三相インバータの角速度である。

系統連系する場合の詳しいことは 5.2 と 5.3 に示す。

【三相負荷モデル】

定電力(P-Q)モデルを用いる。ただし今回は力率を 1 としている。その理由は力率を考えると配電線の制御が必要となるので、無効電力は考えていない。また、三相負荷を使用している理由は電気料金の契約には電灯と動力がある。電灯とは蛍光灯や白熱灯といった照明器具のことをいい、主に単相で表される。動力とは電灯および小型機器以外の電気機器をいい、主に三相電源で使用されるエアコンなどのことをいう。今回は動力で考えているので三相負荷を使用している。

5.2 三相インバータと三相電源の同期投入方法

図5.2のシミュレーションモデルにおいて、系統電力（図5.2に示す三相電源）と連系するロジックについて検討した。すなわち、同期検定できるプログラムを作成した。ここでは、三相インバータと電力系統を模擬した三相電源の同期投入に関するシミュレーションを行う。

(1) 同期投入のプロセス

三相インバータと三相電源の同期投入は、同期発電機を並列運転させる時と同じ考え方を用いる。同期発電機を並列運転する際には、同期検定灯によって同期検定を行う方法が最も簡単である。ここでは一般的な同期投入方法について説明する。まず、図5.6に同期検定灯を同期発電機AとBに接続した図を示す。A機の運転中にB機を並行運転させるためには、B機をガバナによって回転数を調整し、A機の運転状態に近づき L_1 の電灯が消え、 L_2 、 L_3 の電灯の明るさが等しくなった瞬間に、主スイッチSを閉じることで並行運転が達成できる。 L_1 、 L_2 、 L_3 の電灯にはそれぞれ $E_a=E_1-E_1'$ 、 $E_b=E_2-E_3'$ 、 $E_c=E_3-E_2'$ なる電圧が加わっている。図5.7の同期検定灯接続図の電気回路図と電圧フェーザ図に示すように、A機とB機が同期となる場合には位相が等しくなるので、 L_1 灯は相対する相に、 L_2 、 L_3 灯は相が入れ違って接続されているから E_a の値は0、 E_b 、 E_c の値は線間電圧に等しいことになる。よって L_1 電灯は消え、 L_2 、 L_3 は線間電圧をうけて明るさが等しくなる。以上より、2つの系統間の同期が行える。

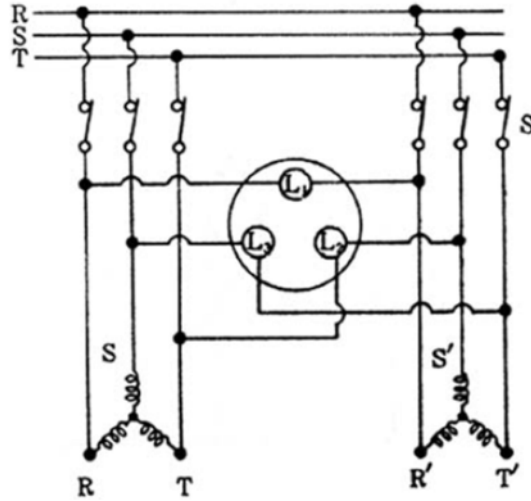


図5.6 一般的な同期検定灯接続図出典[4]

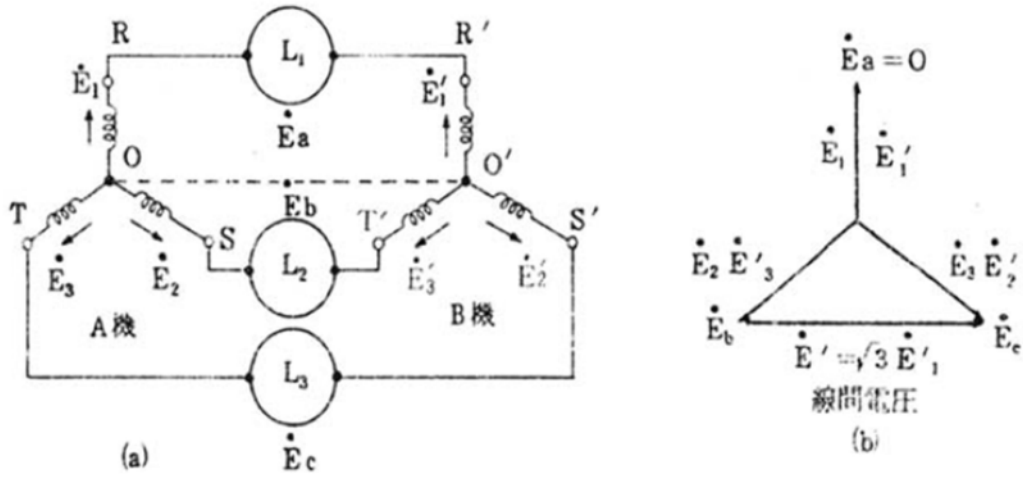


図5.7 電気回路図と電圧フェーザ図

本研究で作成した同期投入のプログラムは、以上の同期検定のプロセスを参考にした。

5.3 系統連系用三相インバータの制御方法

(2) 双方向DC/ACコンバータの制御

現在、双方向DC/ACコンバータは図5.2に示すように、双方向DC/DCコンバータと三相インバータで構成している。同期投入する際に双方向DC/ACコンバータに必要な制御は、電圧制御と電力制御の2つである。双方向DC/DCコンバータは三相インバータの出力線間電圧 V_{inv} が指令値 V_{ref} になるようにバス電圧 V_{bus} を制御している。双方向コンバータの電圧制御ブロックを図5.8に示す。また、三相インバータは、同期投入された後は、その出力電力 P_{inv} が指定した電力 P_{ref} を出力するように三相インバータ内部の位相角 θ を制御する。三相インバータの電力制御ブロックを図5.9に示す。

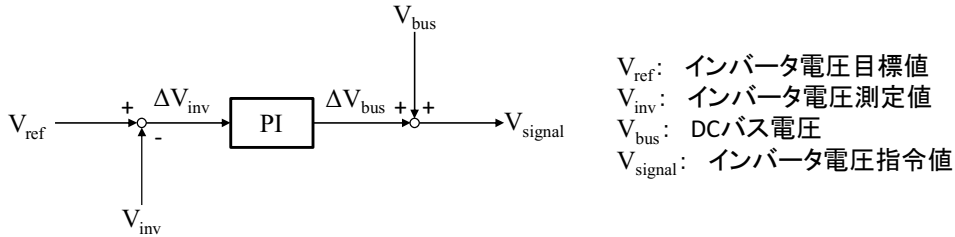


図5.8 双方向DC/DCの電圧制御ブロック

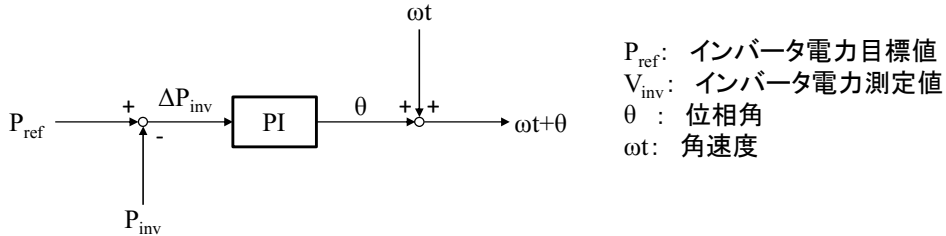


図5.9 三相インバータの電力制御ブロック

なお、三相インバータは同期投入されるまでは Breaker の三相電源側の電圧波形から制御信号を作成し、同期投入された後は、三相電源とは別の信号から制御信号を作成するよう切替えを行っている。

5.4 シミュレーション

本研究では、各機器の制御性を確認するため、以下のステップでシミュレーションを行った。

- ・ステップ1：定常状態での制御性の確認：

日射量変化なし、同期投入後の電力変化なし（系統電力との授受なし）

- ・ステップ2：一部定常状態での制御性の確認：

日射量変化なし、同期投入後の電力変化あり（系統電力との授受あり）

- ・ステップ3：通常の運用状態での制御性の確認：

日射量変化あり、同期投入後の電力変化あり（系統電力との授受あり）

- ・ステップ4：自立運転の可能性の確認：

ステップ3の状態、日射量変化に応じて自動的に系統並列・解列を行うプログラムを実装する。

【ステップ1：日射量一定を仮定、同期投入後の電力変化はないものとする】

まず、同期投入時に日射量変化なし、同期投入後の電力変化なしでのシミュレーションを行った。図5.10にDCバス電圧を、図5.11に三相インバータのAC側線間電圧（実効値）を示す。

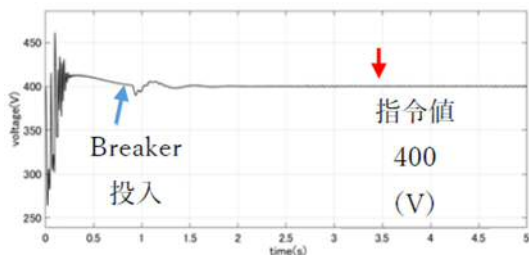


図 5.10 DC バス電圧

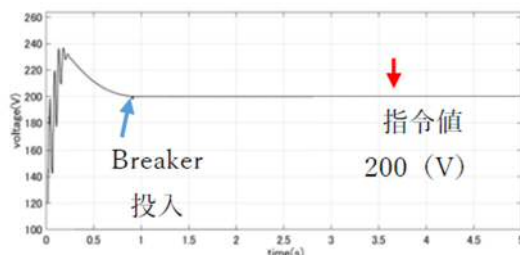


図 5.11 三相インバータの交流側線間電圧

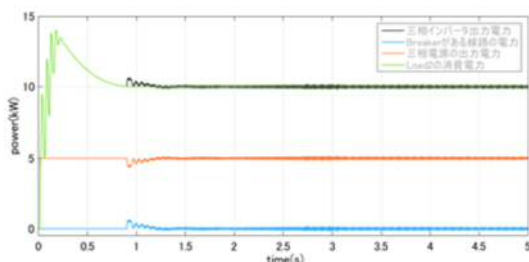


図 5.12 各電力波形

図5.10および図5.11に示すとおり、約0.9 (s) で同期投入が行われた後も安定して電圧維持できていることがわかる。図5.12に三相インバータの出力電力、Breakerがある線路の電力、三相電源の出力電力、そして、三相負荷の消費電力を示す。

図5.12より、約0.9 (s) でマイクログリッドと三相電源が接続された後、三相インバータの出力電力の指令値 P_{ref} を10 (kW) としている。同期投入直後も各電力はまったく変動がないのが理想的だが、マイクログリッドの電圧波形と三相電源側の電圧波形が完全に一致させることは困難なため、同期投入直後に若干の変動が発生している。

【ステップ2：日射量一定を仮定、同期投入後の電力変化を考慮する】

次に、同期投入後の P_{ref} の値を徐々に減らしていき、最終的に P_{pv} の値にした時のシミュレーション結果を示す。図5.13にDCバス電圧を、図5.14に三相インバータの交流側線間電圧（実効値）を示す。

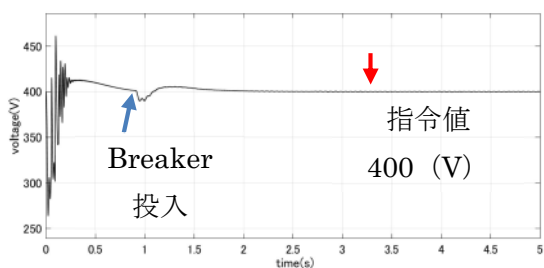


図 5.13 DC バス電圧

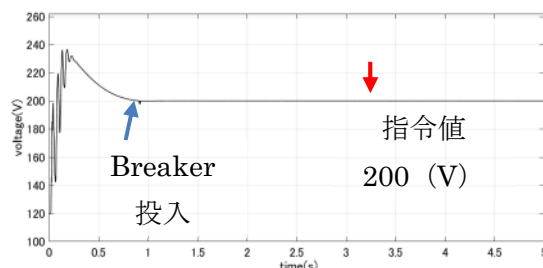


図 5.14 三相インバータの交流側線間電圧

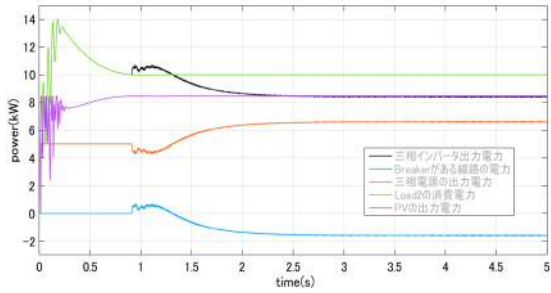


図 5.15 各電力波形

図5.13および図5.14の通り、約0.9 (s) で同期投入が行われた後も安定して電圧維持できていることがわかる。図5.15に三相インバータの出力電力、Breakerがある線路の電力、三相電源の出力電力、三相負荷の消費電力、そしてPVの出力電力 P_{pv} を示す。図5.15より約0.9 (s) で同期投入された後、三相インバータの出力電力が下がり始め、最終的にPVの出力電力 P_{pv} にほぼ等しくなっていることがわかる。

【ステップ3：日射量変化を考慮し、同期投入後の電力変化も考慮する（通常運用パターン）】

次に、日射量を図5.16に示すように変化させたときに、前述と同様なシミュレーションを行った。図5.17にDCバス電圧を、図5.18に三相インバータの交流側線間電圧（実効値）を、図5.19に各電力波形を示す。

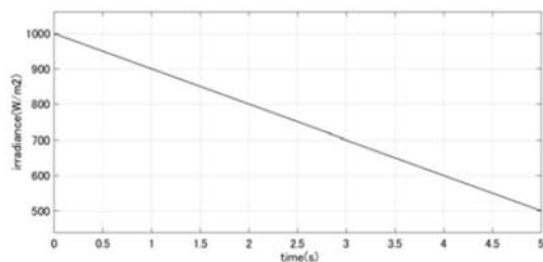


図 5.16 日射量

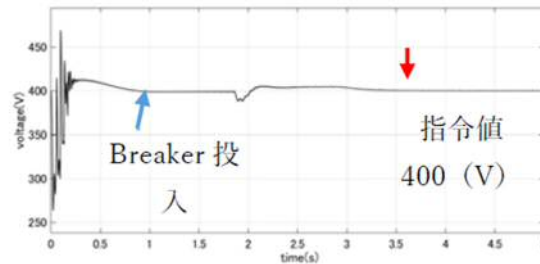


図 5.17 DC バス電圧

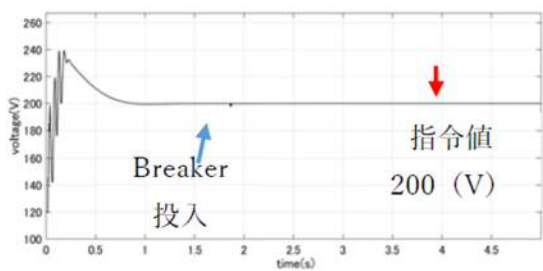


図 5.18 三相インバータの交流側線間電圧

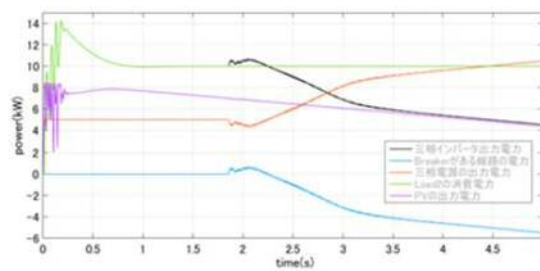


図 5.19 各電力波形

図5.17、5.18、5.19から日射量を変化させても、負荷に対して安定な電力供給ができていることがわかる。

【ステップ4：自立運転パターン（系統並列と解列）】

次に、日射量変化に応じて、自動的に連系・自立運転ができるようにプログラムを改良した。まず、Breakerの投入・開放を行うために、PVの発電電力 P_{pv} の値によってもBreakerを投入するか開放するか判断を行う項を同期投入のプログラムに追加した。 $P_{pv} > 7000$ (W) ならBreaker開放、 $P_{pv} < 7000$ (W) ならBreaker

投入としている。日射量が図5.20のように変化したときのDCバス電圧を図5.21に、三相インバータの交流側線間電圧（実効値）を図5.22に、各電力波形を図5.23に示す。

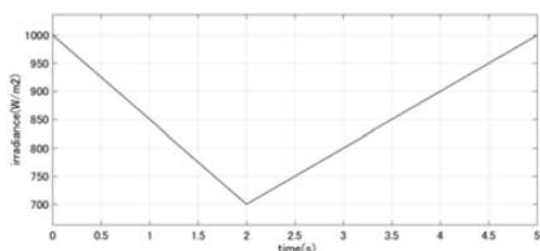


図 5.20 日射量

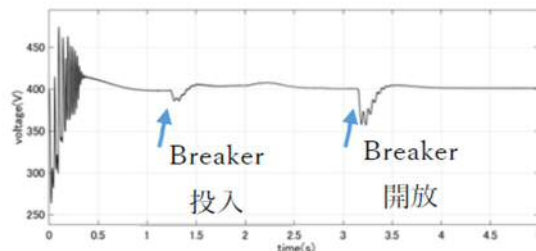


図 5.21 DC バス電圧

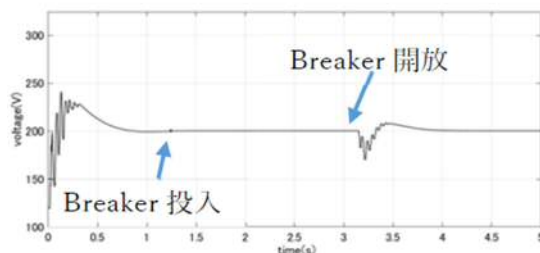


図 5.22 三相インバータの交流側線間電圧

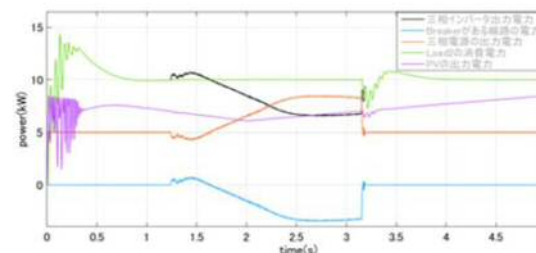


図 5.23 各電力波形

図 5.21、5.22 より各電圧は Breaker の投入・開放に対しても指令値に戻ろうとしているのがわかる。そして、図 5.23 より Breaker 投入後は三相インバータの出力電力は PV の出力電力と等しくなり、PV の出力電力が 7000 (W) を超えると Breaker が開放され、三相負荷に PV と LiB のみで電力を供給しているのがわかる。

5.5 考察とまとめ

本研究では、マイクログリッドと三相電源との同期投入と開放についてのシミュレーションを行った。DC バス電圧、三相インバータの交流側線間電圧、そして各電力波形の考察することで、開発したプログラムがうまく機能していることがわかった。

第6章 BCPを考慮した災害時の地域連系に関する調査

6.1 BCPの概要

BCP (Business continuity planning) とは企業が自然災害や火災などの緊急事態に遭遇した場合において、事業資産の損害を最小限にとどめつつ、中核となる事業の継続あるいは早期復旧を可能とするために、平常時に行うべき活動や緊急時における事業継続のための方法、手段などを取り決めておく計画のことである。BCP を常日頃から周到に準備している企業は、顧客の信頼を維持し、属している業界から高い評価を受けることになる。図 6.1 に BCP の概略図を示す。

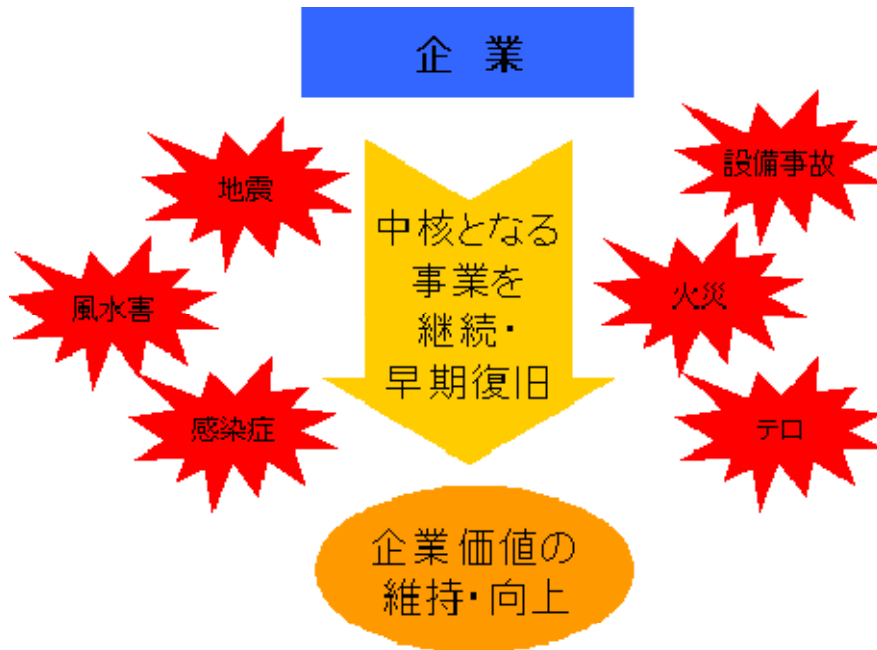


図 6.1 BCP の概略図

(中小企業庁編：BCP（事業継続計画）とは^[7.1])

BCP の特徴以下に示す 5 つである。

- ① 優先して継続・復旧すべき事業を決定
- ② 非常において、事業の目標復旧時間を設定
- ③ 非常時に提供できるサービスの程度を規定
- ④ 事業拠点や生産設備などの代替策を準備
- ⑤ すべての従業員に対して、事前に BCP を周知

図 6.2 に BCP を導入することによるメリットイメージを示す。

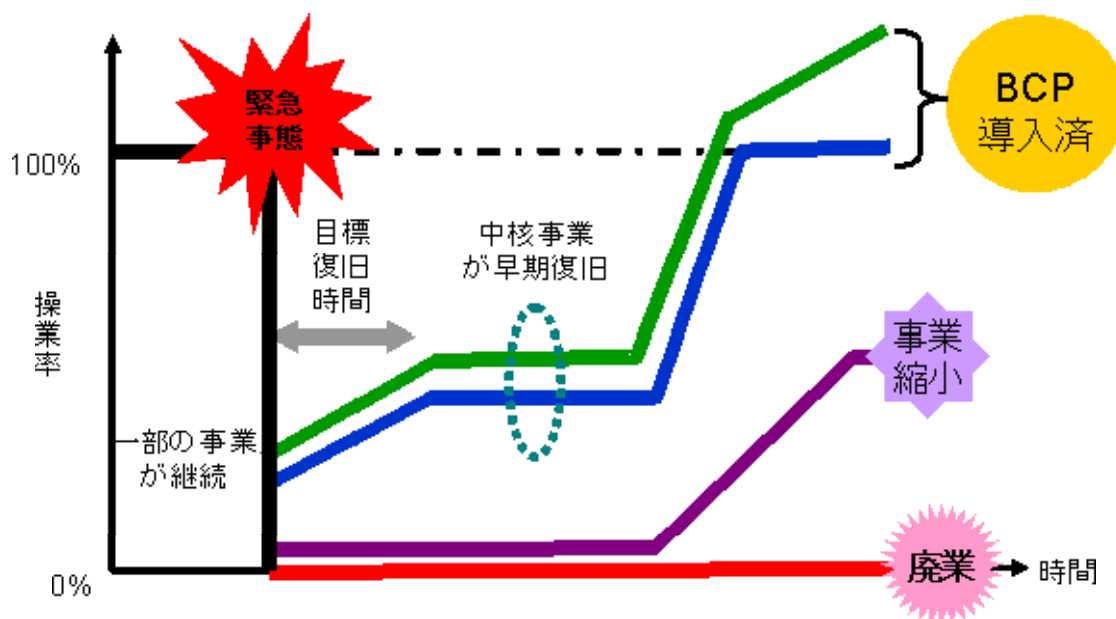


図 6.2 BCP 導入効果のイメージ

(中小企業庁編：BCP（事業継続計画）とは^[7.1])

東日本大震災以降、BCP の重要性が、特に取りざたされるようになった。電気的な分野における BCP として非常用電源の設置が挙げられる。自然災害で電力会社からの電力供給が途絶えた場合、BT に貯めておいた電力を使用することで、事業継続が可能となる。さらに、近年では、BT と再生可能エネルギーを組み合わせた小規模な電力システムの構築によって、BT にためておいた電力だけでなく再生可能エネルギーによる発電によっても特定の負荷に対して電力供給が行えるようになっている。また、再生可能エネルギーによる発電の余剰電力を、BT に貯めておくことで、停電などの非常期間が長時間継続したとしても、完全停電に至る可能性を低くすることが可能となる。可能な限り長期間、電力供給を維持することは、企業だけでなく庁舎や行政機関施設などの地域の防災拠点となる建物でも重要となっている。前述した、BT と再生可能エネルギーを含む電力システムは、防災活動を円滑に、かつ長期間行いたい公的機関にも導入が広がってきている。

6.2 BCP を考慮した蓄電池運用計画

蓄電システムは、電力不足問題によって事業運営が不可能になってしまう際に必ず必要とされる設備システムである。そのため、緊急時に備えて、常に蓄電池を一定以上の SOC で保つ必要がある。そこで、画面構築における蓄電池運用モードに BCP 優先モードを導入した。このモードは、使用者によって入力された SOC を保ちつつ蓄電池運用を行うモードである。このモードを選択することによって、BCP を考慮した蓄電池運用計画を策定することができる。通常モードと BCP モードを比較した結果を図 6.3 に示す。

結果より、一定の SOC を保ちつつ運用できていることが分かる。また、本研究では、BT 最大容量を変数としていることから、ある期間経過時の詳細な BT 容量を把握することができ、より正確な BCP 計画を立てることができると考えられる。さらに、温度制約や寿命劣化抑制制約により、サイクル数などの条件によっては、蓄電池寿命劣化を抑制した BT 運用計画を策定可能であり、BCP にとっても役に立つと考えられる。しかし、BCP を考慮できる一方、蓄電池の運用が制限されることにより、日々の電気料金は上昇してしまう。例として、下限 SOC と電気料金の変化を図 6.4 に示す。そのため、電力不足による損失や蓄電池のインシャルコストなどを踏まえて、通常時と非常時のどちらかを優先した運用計画を策定するか決定する必要がある。

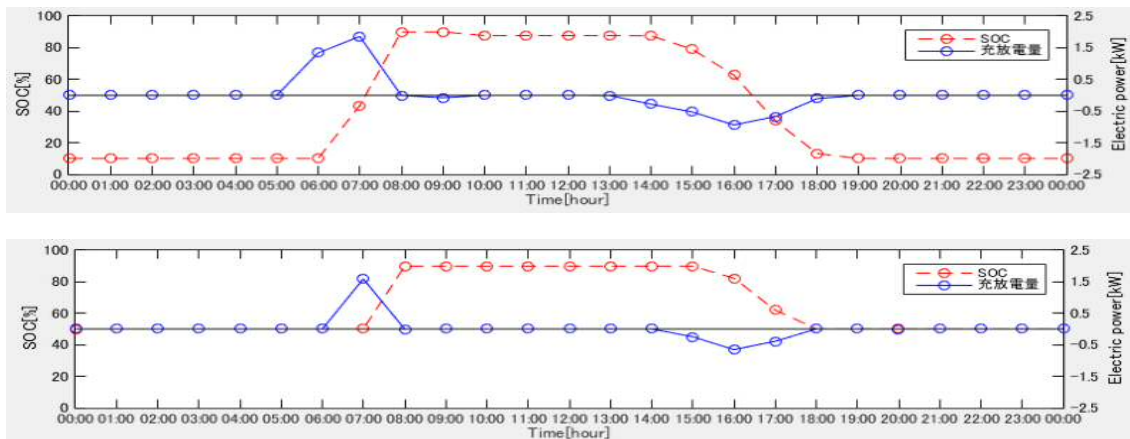


図 6.3 (上)通常モード(下)BCPモード(下限 50%)

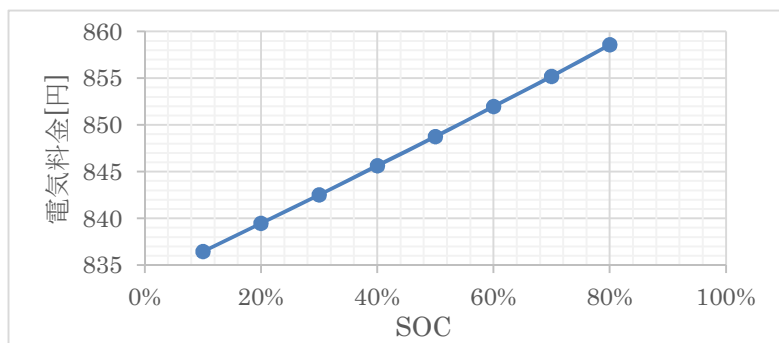


図 6.4 下限 SOC と電気料金

6.3 BCP を考慮した EMS 制御

本研究では、これまでに図 5.1 に示す広島大学 EMS 実験研究棟の実験設備を想定した PV や BT を有する小規模のグリッドのシミュレーションモデルを MATLAB/Simulink SimPowerSystems 上で作成し、様々な条件下で最適に制御する手法について検討してきた。

これまで PV や LiB を制御するスイッチング機器をスイッチングデバイスを用いて構築し、様々な条件下でシミュレーションを行ってきたが、その際に計算時間の長時間化が問題となっていた。そのため、より汎用性の高めたシミュレーションツールにするために、計算時間の短縮を目的としたスイッチングデバイスの平均値モデル化について本稿で報告する。

6.3.1 シミュレーションモデル

広島大学の実験研究棟の一部を模擬したシミュレーションモデルを図 6.5 に示す。

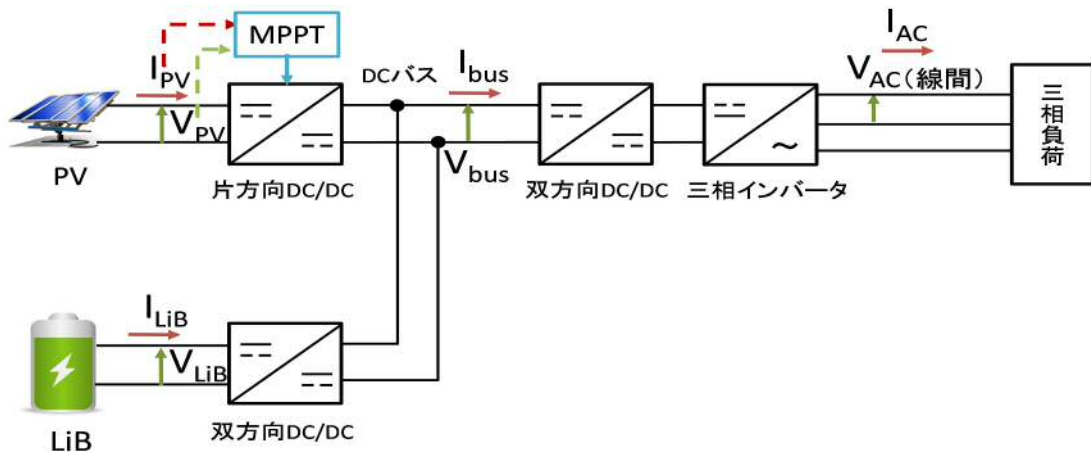


図 6.5 シミュレーションモデル

6.3.2 平均値モデルとスイッチングモデル

図 6.5 に示すシミュレーションモデルにおいて、片方向 DC/DC コンバータや三相インバータなどのスイッチング機器にはスイッチングデバイスを用いて、PWM 制御にて所定の値を出力させている。この PWM 制御を行う際のキャリア周波数 f_c と離散シミュレーションを行う際のサンプリング時間 T_s によって、計算時間の長時間化が課題となっている。そのため、スイッチングデバイスを用いず、片方向 DC/DC コンバータや三相インバータなどを平均値モデルで実現できれば計算時間の短縮が期待できる。

【昇圧型 DC/DC コンバータ】

図 6.6 に昇圧型 DC/DC コンバータのスイッチングモデル図と平均値モデル図を示す。図 6.6 より昇圧型 DC/DC コンバータのスイッチングデバイス T_r は、低電圧側(入力側)は電圧源に、高電圧側(出力側)は電流源に置き換えられる。

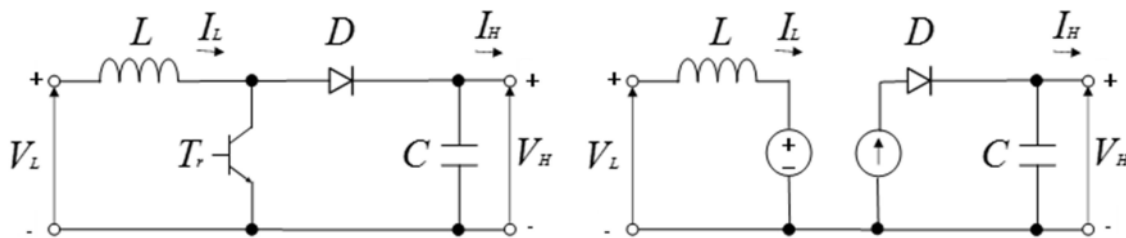


図 6.6 昇圧型 DC/DC コンバータのスイッチングモデルと平均値モデル

置き換えられた電圧源と電流源のそれぞれの値は次式によって決定される。

$$V_L = (1-d)V_H \quad (6.1)$$

$$I_H = (1-d)I_L \quad (6.2)$$

ここで V_L と I_L は低電圧側の電圧と電流であり、 V_H と I_H は高電圧側の電圧と電流である。

【降圧型 DC/DC コンバータ】

図 6.7 より、降圧型 DC/DC コンバータは昇圧型と同様に、高電圧側(入力側)は電流源で、低電圧側(出力側)は電圧源で置き換えられる。

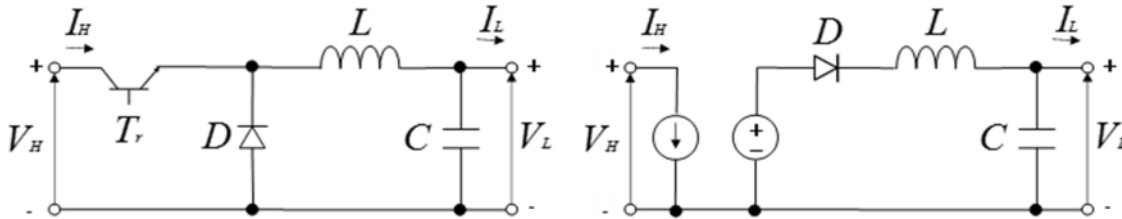


図 6.7 降圧型 DC/DC コンバータのスイッチングモデルと平均値モデル

置き換えられた電圧源と電流源のそれぞれの値は次式によって決定される。

$$V_L = dV_H \quad (6.3)$$

$$I_H = dI_L \quad (6.4)$$

【昇降圧型 DC/DC コンバータ】

図 6.8 に昇降圧型 DC/DC コンバータは昇圧型と降圧型と同様に、左側 (LiB 側) は電圧源に、右側 (DC バス側) は電流源に置き換えられる。

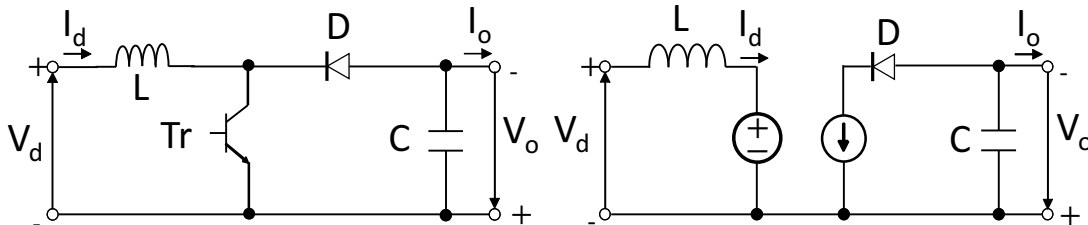


図 6.8 昇降圧型 DC/DC コンバータのスイッチングモデル(左)と平均値モデル(右)

置き換えられた電圧源と電流源のそれぞれの値は次式によって決定される。

$$V_d = \frac{1-d}{d}V_o \quad (6.5)$$

$$I_d = -\frac{1-d}{d}I_o \quad (6.6)$$

ここで V_d と I_d は LiB 側の電圧と電流であり、 V_o と I_o は DC バス側の電圧と電流である。

【三相インバータ】

三相インバータも DC/DC コンバータの時と同様に、スイッチングデバイスを電圧源と電流源に置き換えることでスイッチングモデルを平均値モデルへと変換することが可能である。三相インバータのスイ

スイッチングモデルと平均値モデルを図 6.9 に示す。

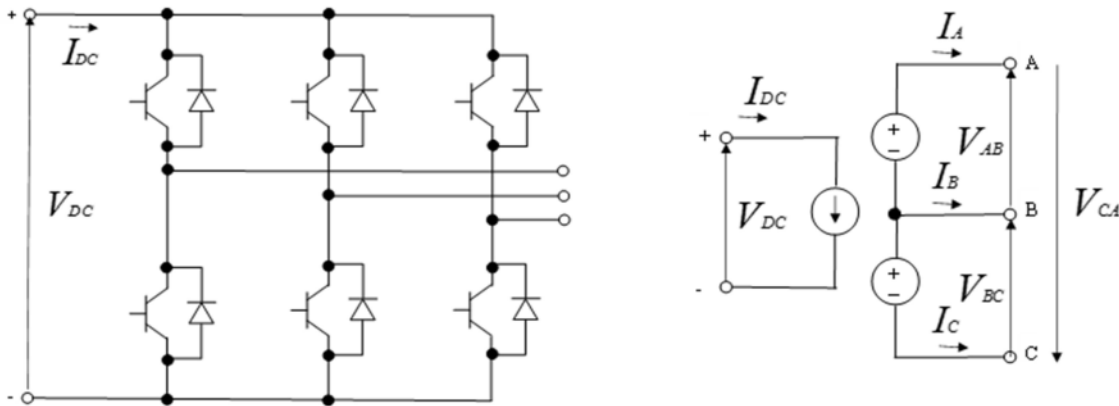


図 6.9 三相インバータのスイッチングモデルと平均値モデル

ここで、 V_{DC} と I_{DC} は DC 側の電流と電圧、 V_{AB} と V_{BC} は三相の線間電圧である。 V_{AB} と V_{BC} は想定する三相交流電圧（例えば 200 (V)）と位相、そして周波数を与える。 I_A と I_C は各相を流れる電流である。図 6.9 において、電流源の値は次式より決定される。

$$I_{DC} = \frac{V_{AB}I_A - V_{BC}I_C}{V_{DC}} \quad (6.7)$$

6.3.3 シミュレーション

本節では、まず、図 6.5 のシミュレーションモデルをスイッチングモデルと平均値モデルでそれぞれ構築し、両モデルの比較シミュレーションを行う。そして出力波形とシミュレーション計算時間の比較を行い、平均値モデルの有用性を示していく。

シミュレーション計算時間の大幅な短縮が確認できた段階で、実運用を想定した長時間の需給シミュレーションを行い、EMS 開発をするために現実的なシミュレーション計算時間で行えることを確認する。

【スイッチングモデルと平均値モデルの比較シミュレーション】

本シミュレーションにおける PV と LiB の諸元は、広島大学実験研究棟設備の実際の値を用いる。

・PV パネル

日射量：1000[W/m²]一定、セル温度：25[°C]一定、開放電圧：29.7[V/module]

短絡電流：8.6[A/module]、直列接続数：11[個/string]、並列ストリング数：4[個]

・LiB

出力容量：1.2[kWh/個]、SOC 初期値：60[%]、公称電圧：51.2[V]

定格放電電流：17.4[A/個]、並列接続数：3[個]

○負荷変動

スイッチングモデルと平均値モデルの出力波形の差を検証するために、図 6.10 に示す負荷変動を模擬したシミュレーションを行う。なお負荷の変動は瞬間的に行われるものとする。

状態 1：0[s]から 2[s]の間は、模擬負荷の指令値は 5[kW]

状態 2：2[s]から 4[s]の間は、模擬負荷の指令値は 10[kW]

状態 3：4[s]から 6[s]の間は、模擬負荷の指令値は 1[kW]

状態 4：6[s]から 8[s]の間は、模擬負荷の指令値は 10[kW]

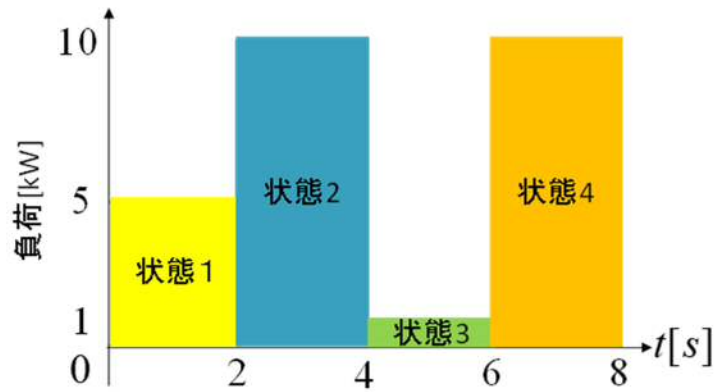


図 6.10 負荷変動の模擬

○シミュレーション結果

シミュレーションの PV 発電電力、LiB の充放電電力、そして負荷の消費電力波形を図 6.11 に示す。なお、本シミュレーションにおけるサンプリング時間はスイッチングモデルでは 10[μs]とし、平均値モデルでは 10[μs]、100[μs]、そして 1000[μs]の 3 パターン行う。

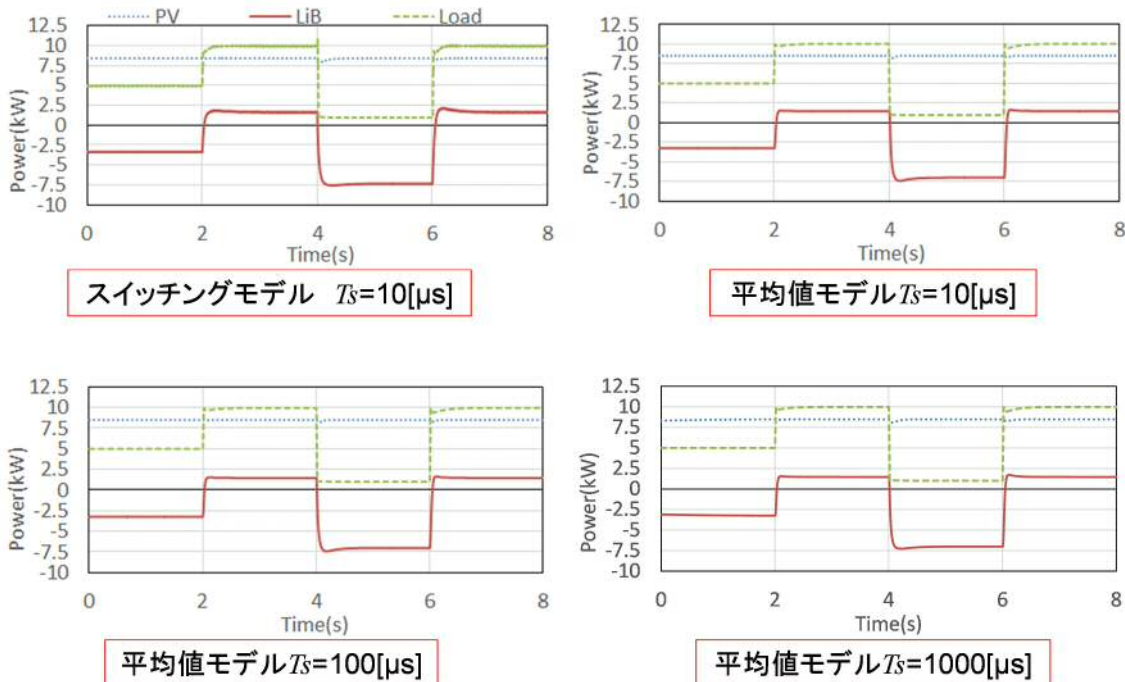


図 6.11 各電力波形

ここで、図 6.11 において、青の点線が PV の発電電力、赤の実線が LiB の充放電電力、そして緑の破線が負荷の消費電力である。図 6.11 より、スイッチングモデルと平均値モデルは上記した状態 1~4 に従って動作している。また、各波形において、負荷変動後の波形の挙動に多少の差はあるものの、大きな差異はないと見て取れる。しかし、平均値モデルがスイッチングモデルに対してどれだけの誤差を持っているかを (6.8) 式に示す相対誤差の絶対値を用いて評価を行う。

$$\varepsilon = \left| \frac{X_a - X_s}{X_s} \right| \times 100 [\%] \dots\dots\dots (6.8)$$

ここで ε は相対誤差の絶対値である。また X_s は平均値モデルの値(例えば PV の発電電力など)、 X_a は

詳細モデルの値である。図 6.12 に特に相対誤差が大きかった LiB の充放電電力の波形を示す。PV の発電電力と負荷の消費電力に関しては、ほぼ誤差がないことを確認している。

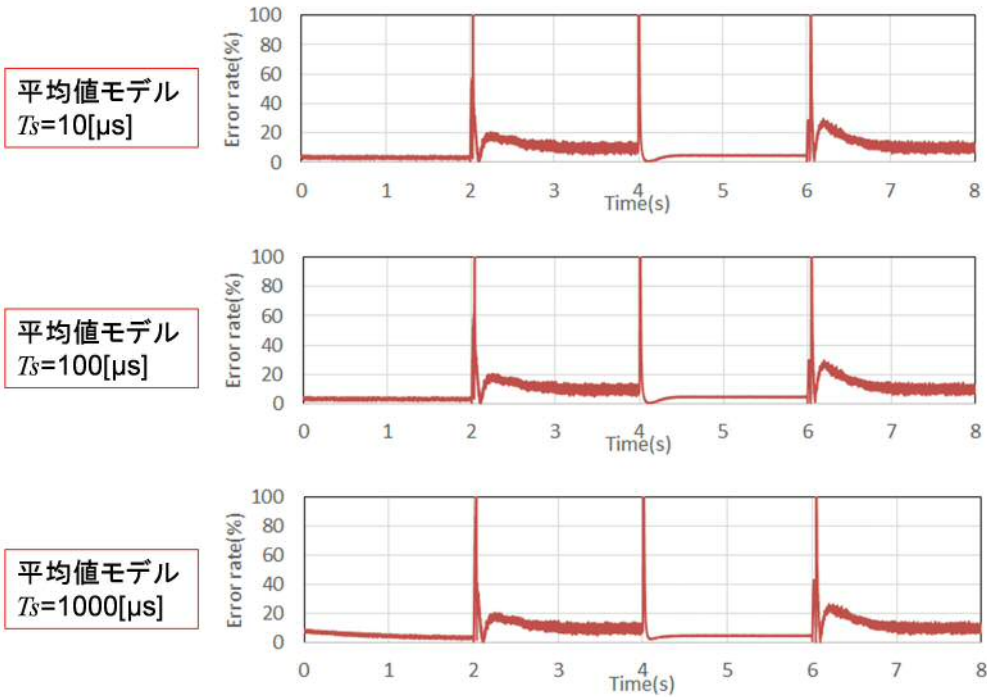


図 6.12 LiB の充放電電力の相対誤差

図 6.12 より、LiB の充放電電力は T_s が変化しても相対誤差の結果に大きな差は見取れない。負荷変動が発生するタイミングで大きな誤差が見取れるが、負荷変動がおさまった後は、ほとんど誤差はないことも確認できる。

それぞれのシミュレーションの計算時間を表 6.1 に示す。

表 6.1 各シミュレーションの計算時間

スイッチングモデル	平均値モデル		
	$T_s=10[\mu s]$	$T_s=100[\mu s]$	$T_s=1000[\mu s]$
	90.2[s]	2.41[s]	1.36[s]

表 6.1 より、スイッチングモデルに比べて平均値モデルの計算時間は大幅に短く、そして T_s の値が大きければ、さらに計算時間が短くなっていることがわかる。従って、動的なシミュレーションにおいて平均値モデルは非常に有用であると考えている。

【実運用需給シミュレーション】

実運用需給シミュレーションを想定するため、PV と蓄電池の容量の仮定を行う。PV と蓄電池の算定式は文献[6.2]を参照する。

○PV 容量の算定

PV 容量の算定式は(6.9)式に示す通りである。

$$W_h = P_c \frac{M_s}{K_s} K_l \dots\dots\dots (6.9)$$

ここで、 W_h は一日の発電量[kWh/日]、 P_c は太陽電池容量[kW]、 M_s は月毎の平均日射量[kWh/m²・日]、 K_s は標準日射強度[kW/m²]、そして K_l は出力係数である。

(6.9)式の P_c を算出するためにまず、一日の発電量 W_h を一日の負荷の使用電力量とする。図 6.13 に示すような日負荷曲線を想定すると、 W_h は 71.75[kWh]となる。

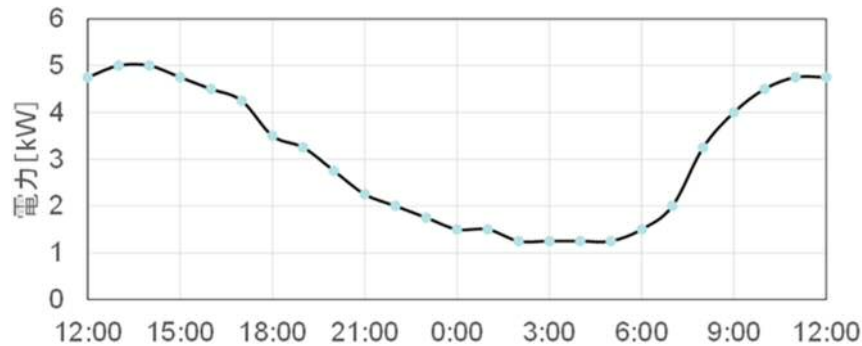


図 6.13 一日の負荷パターン例

次に、月毎の平均日射量 M_s を決定する。例えば、東広島における平均日射量 M_s は表 6.2 のように公表されている。一般的に設備容量を算定する際には、最も厳しい条件を考慮するため最小の値を選択する。従って、 M_s には一月の値を選択する。

表 6.2 東広島における月毎の平均日射量

月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
日射量	2.92	3.49	4.08	4.65	4.71	4.16	4.35	4.70	4.01	3.97	3.23	2.97

続いて、標準日射強度 K_s と出力係数 K_l を決定する。標準日射強度 K_s は標準仕様状態（周囲温度-20℃～+40℃、相対湿度 45%～95%）においては 1 と決定される。出力係数 K_l は年平均セルの温度上昇による損失、パワーコンディショナによる損失、そして配線、受光面の汚れなどによる損失を考慮し、0.8 とする。

以上から、 $W_h=71.75$ [kWh]、 $M_s=2.92$ [kWh/m²・日]、 $K_s=1$ 、 $K_l=0.8$ となり太陽電池容量 P_c は(6.10)式よりおよそ 31[kW]と算定される。

$$P_c = \frac{W_h \left(\frac{K_s}{K_l} \right)}{M_s} \dots\dots\dots (6.10)$$

○蓄電池容量の算定

蓄電池容量の算定式は(7.11)式に示す通りである。

$$C_c = \frac{S W_s}{K_2} \dots\dots\dots (6.11)$$

ここで、 C_c は蓄電池容量[kWh]、 W_s は一日の使用電力量[kWh]、 S は連続不日照日、そして K_2 は保守率である。

蓄電池容量の算定も、まず一日の使用電力量 W_s から求める。図 6.13 で示した負荷パターンを用いると、使用電力量 W_s は 71.75[kWh]となる。

次に、連続不日照日 S を決定する。連続不日照日 S の決定には、曇りもしくは雨が何日続くか想定する必要がある。2015年の広島市においては曇りもしくは雨が一日続く確率は約 35%であり、二日連続で曇りもしくは雨となる確率は 20%、そして三日連続で起こる確率は 10%となっている。また、大規模災

害が発生した際に、停電が何日で復旧するののかも想定しておかなければならない。東日本大震災における全体の停電復旧率は、一日後は約 55%、二日後は約 73%、そして三日後には約 82%が停電から復旧している。一方、阪神・淡路大震災における全体の停電復旧率は、一日後は約 90%、二日後は約 95%、そして三日後には約 96%が停電から復旧している。上記した様々なことを総合的に判断して、連続不日照日 S を決定する必要がある。本稿では、連続不日照日 S を 1 とする。

最後に、保守率 K_2 を決定する。保守率とは、経年劣化や蓄電池特有のメモリー効果などによる蓄電池容量の低下を表した定数である。一般的に、鉛蓄電池なら保守率 K_2 は 0.8、LiB なら 1 である。本研究では、LiB を用いるため、保守率 K_2 は 1 と決定する。

以上から、 $W_s = 71.75[\text{kWh}]$ 、 $S = 1$ 、 $K_2 = 1$ となり、蓄電池容量 C_c は(6.11)式より、およそ $72[\text{kWh}]$ と算定される。

算定した PV 容量と蓄電池容量を実現するための各諸元を以下に記す。【スイッチングモデルと平均値モデルの比較シミュレーション】で記した諸元とほぼ同じだが、PV パネルの並列ストリング数が 4 から 15 個に、LiB の並列接続数が 3 から 22 個になっている。

・PV パネル

セル温度：25[°C]一定、開放電圧：29.7[V/module]

短絡電流：8.6[A/module]、直列接続数：11[個/string]、並列ストリング数：15[個]

・LiB

出力容量：1.2[kWh/個]、SOC 初期値：60[%]、公称電圧：51.2[V]

定格放電電流：17.4[A/個]、並列接続数：22[個]

○負荷データ

負荷データは図 6.13 で記した負荷パターンを用いる。

○日射強度データ

日射強度データは、図 6.14 に示す PV300 の東広島市の 2012 年 1 月 18 日の日射強度観測データを用いる。

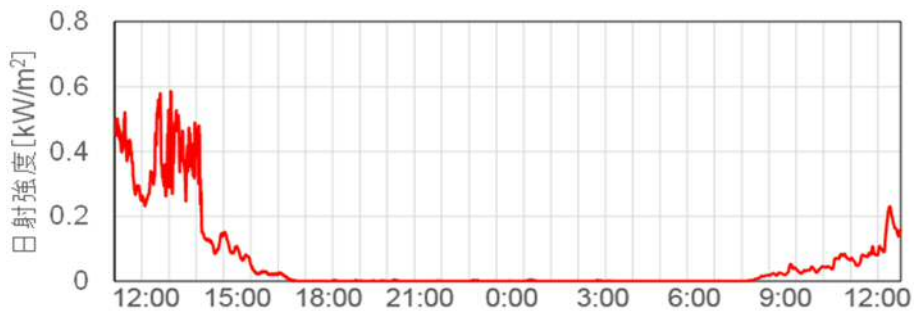
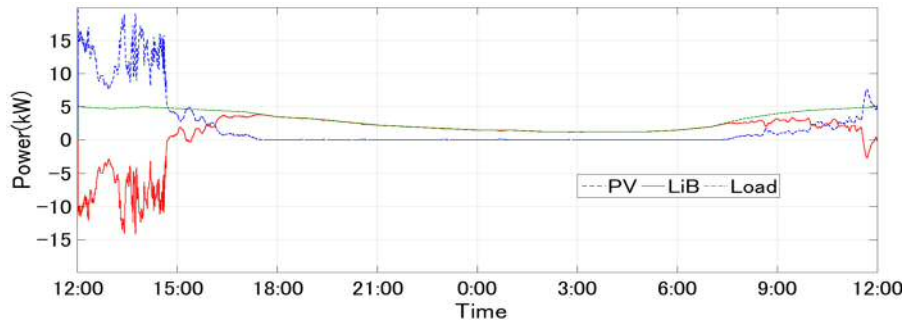


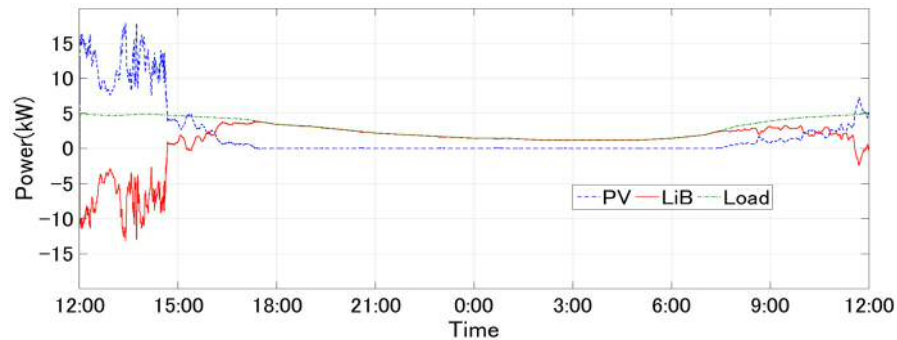
図 6.14 日射強度データ

○シミュレーション結果

実運用需給シミュレーションの PV 発電電力、LiB の充放電電力、そして負荷の消費電力波形を図 6.15 に示す。なお、実運用需給シミュレーションのサンプリング時間は 100[μs]と 1000[μs]とする。



(a) $T_s=100[\mu\text{s}]$



(b) $T_s=1000[\mu\text{s}]$

図 6.15 実運用需給シミュレーションの各電力波形

図 6.15 より、出力波形はサンプリング時間を変化させても大きな差はないことが見て取れる。シミュレーション計算時間を表 6.3 に示す。

表 6.3 実運用需給シミュレーションの計算時間

$T_s=100[\mu\text{s}]$	$T_s=1000[\mu\text{s}]$
24112[s]	1833[s]

計算時間はサンプリング時間を大きくすることで大幅な短縮を図ることができることを確認した。

【PV 測定値を用いたシミュレーション】

広島大学工学部 A1 棟の屋上にある PV 計測器の値を利用した 24 時間の EMS シミュレーションを実施し、各箇所の電力と DC バス電圧と LiB の残存容量(SOC)などを確認する。

○シミュレーション条件

図 6.5 のモデルにおいて、天候は晴・曇・雨の 3 パターンを想定し、日射量と外気温度の波形を図 6.16 に示す。PV パネルと LiB の各諸元は広島大学工学部 A1 棟の設備を参考に以下のように設置した。

・PV パネル

日射量と外気温度：図 6.16 に示す、開放電圧：29.7[V/module]、短絡電流：8.6[A/module]

直列接続数：11[個]、並列接続数：4[個]

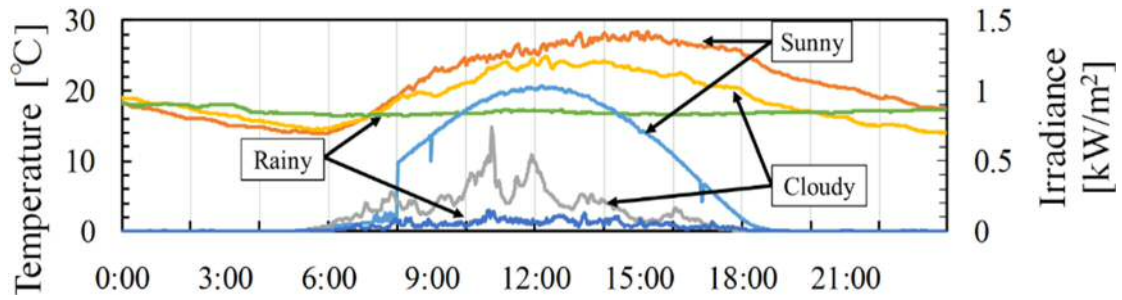


図 6.16 各天候パターンにおける日射量と外気温度

・ LiB

出力容量 : 1.2[kWh/個]、SOC 初期値 : 60[%]、公称電圧 : 51.2[V]

定格放電電流 : 17.4[A/個]、並列接続数 : 3[個]

需要家負荷はホテルを含む計 6 パターンを想定し、それぞれの負荷の波形を図 6.17 にそれぞれ示す^[3.1]。

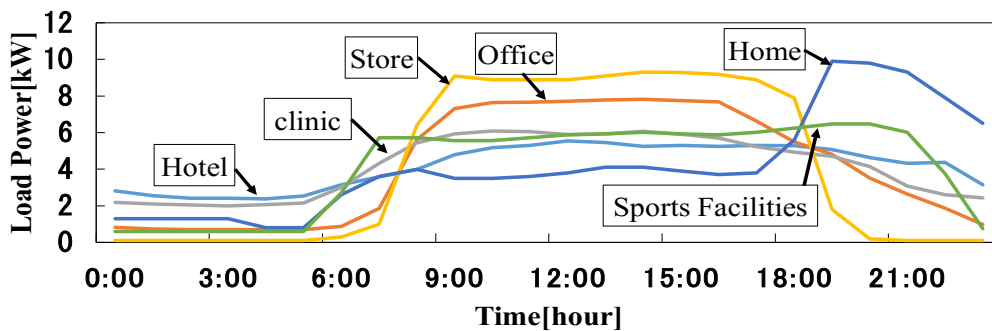
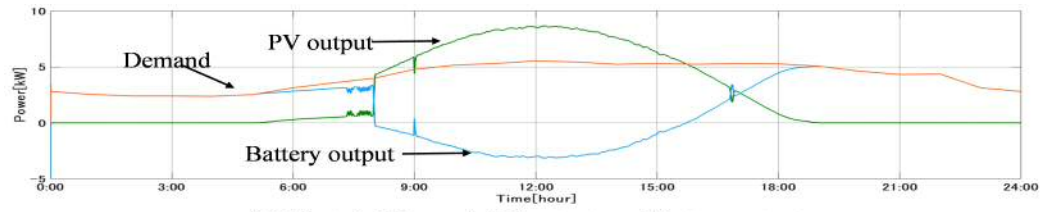


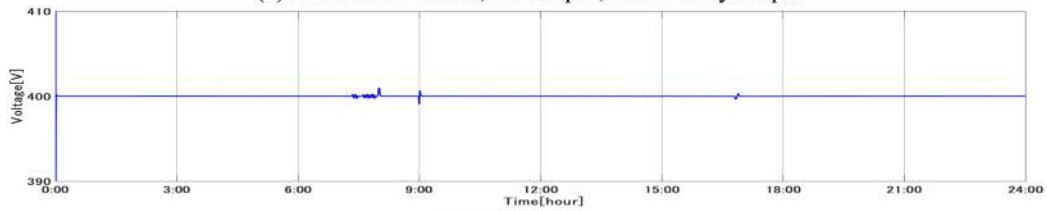
図 6.17 需要家負荷

○シミュレーション結果

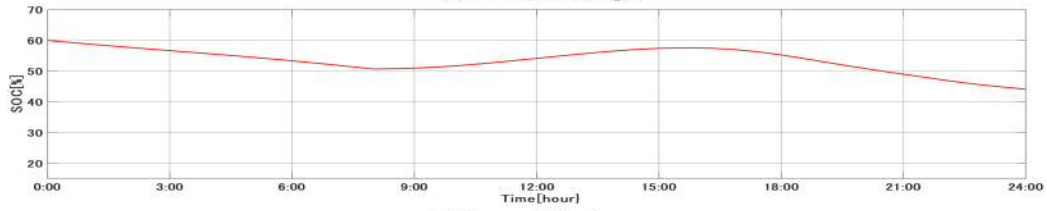
シミュレーション結果を図 6.18~6.35 に示す。(a)に各電力波形を示し、縦軸は電力、横軸は時間を表す。(b)に DC バス電圧の波形を示し、縦軸は電圧、横軸は時間を表す。(c)に SOC の波形を示し、縦軸に SOC、横軸に時間を表す。



(a) Electrical demand, PV output, and Battery output

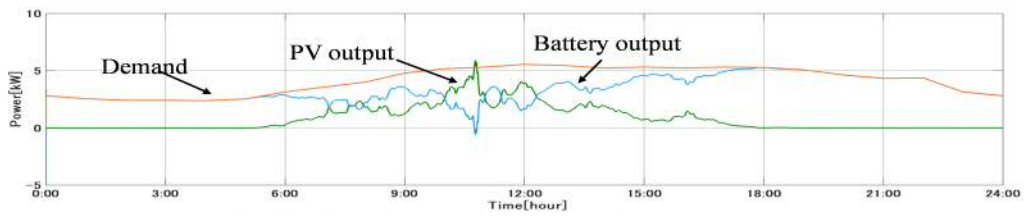


(b) DC bus voltage

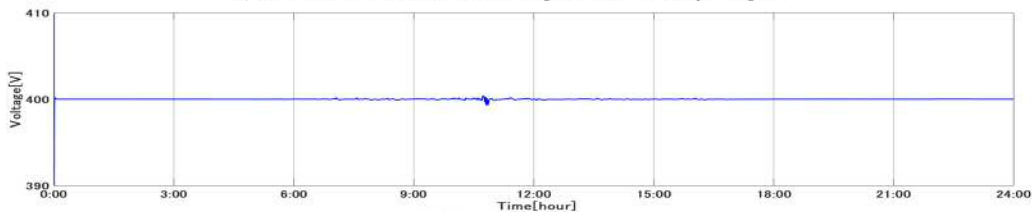


(c) State of discharge

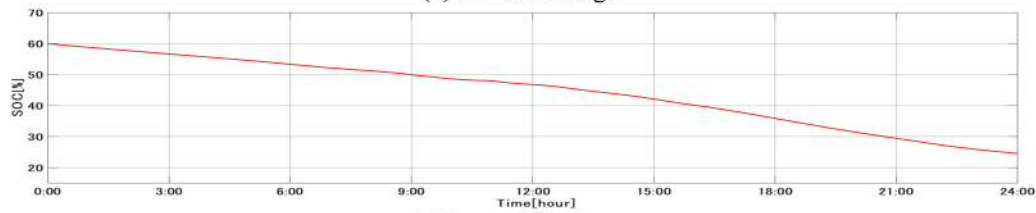
図 6.18 シミュレーション結果 (ホテル、天候：晴れ)



(a) Electrical demand, PV output, and Battery output

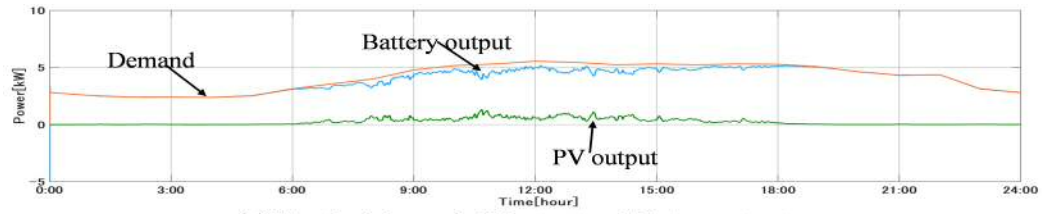


(b) DC bus voltage

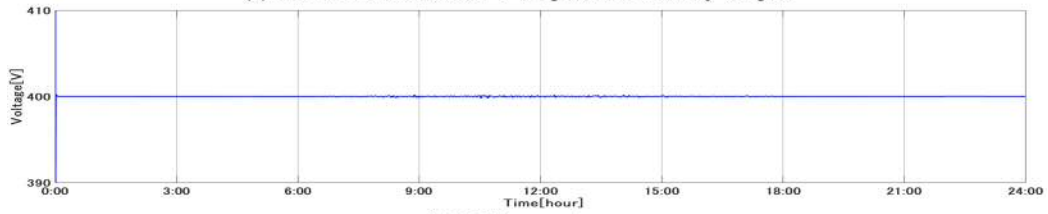


(c) State of discharge

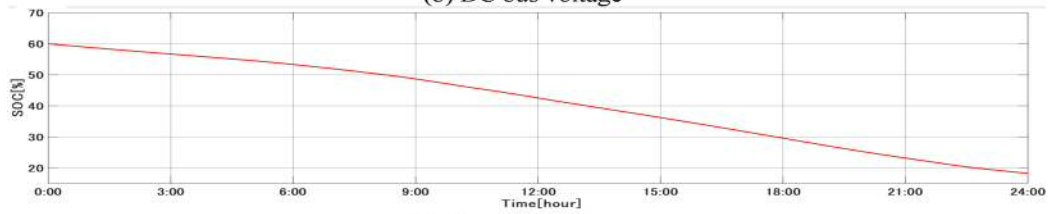
図 6.19 シミュレーション結果 (ホテル、天候：曇り)



(a) Electrical demand, PV output, and Battery output

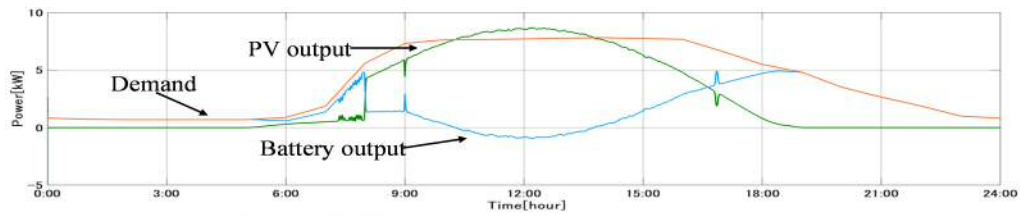


(b) DC bus voltage

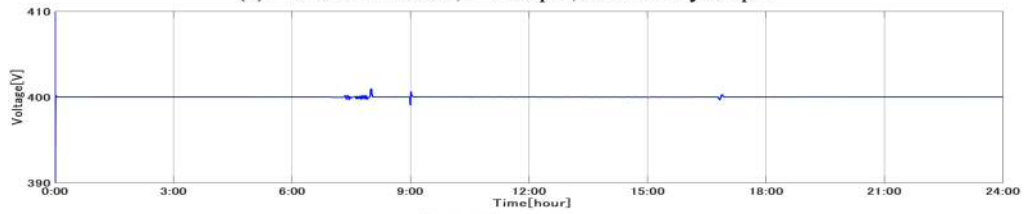


(c) State of discharge

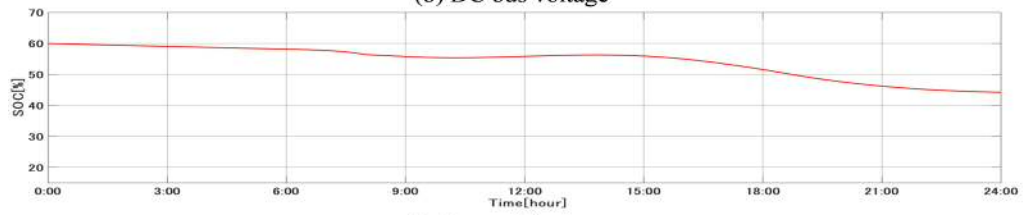
図 6.20 シミュレーション結果 (ホテル、天候：雨)



(a) Electrical demand, PV output, and Battery output

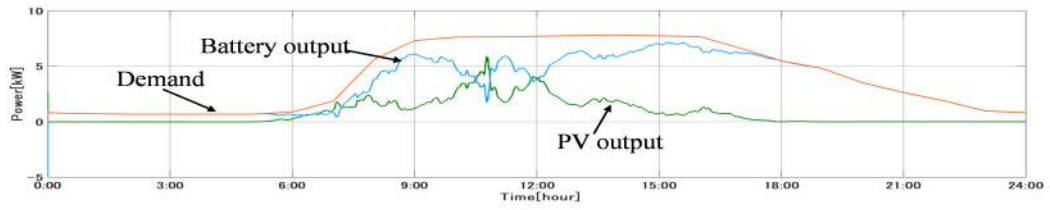


(b) DC bus voltage

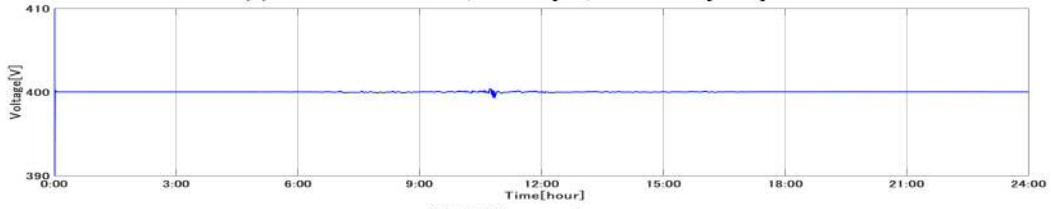


(c) State of discharge

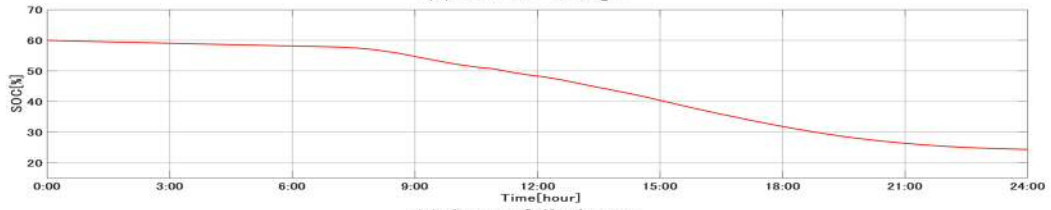
図 6.21 シミュレーション結果 (オフィス、天候：晴れ)



(a) Electrical demand, PV output, and Battery output

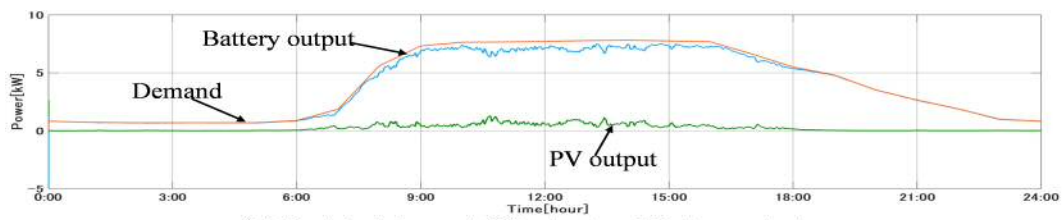


(b) DC bus voltage

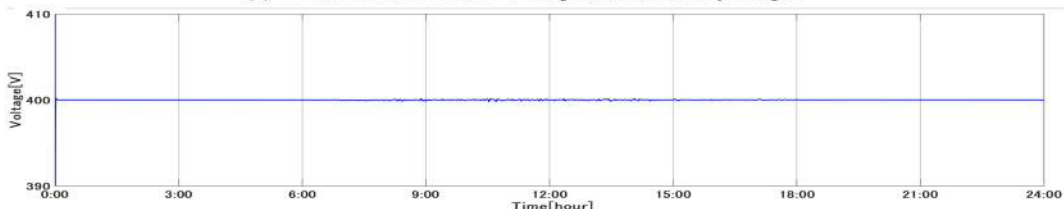


(c) State of discharge

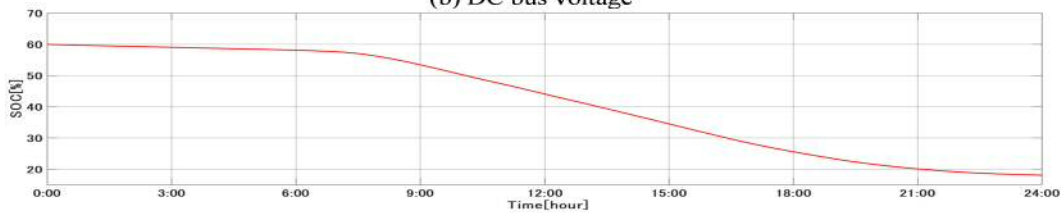
図 6.22 シミュレーション結果 (オフィス、天候：曇り)



(a) Electrical demand, PV output, and Battery output

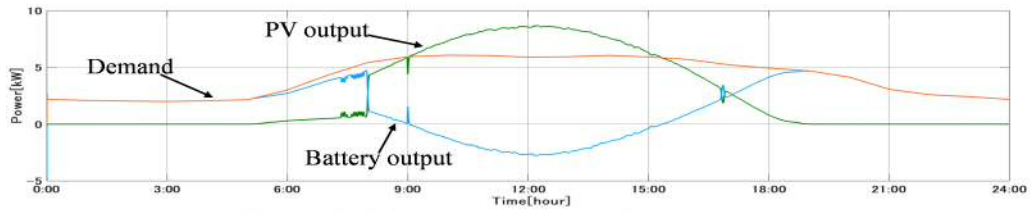


(b) DC bus voltage

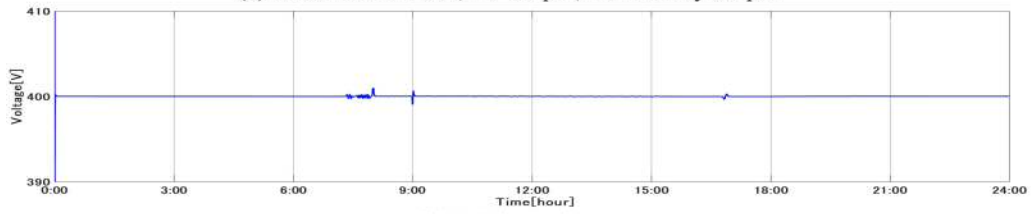


(c) State of discharge

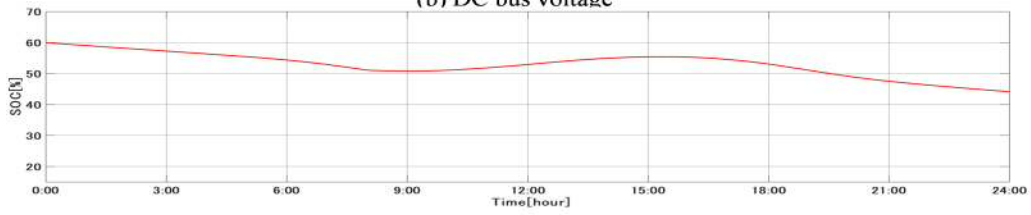
図 6.23 シミュレーション結果 (オフィス、天候：雨)



(a) Electrical demand, PV output, and Battery output

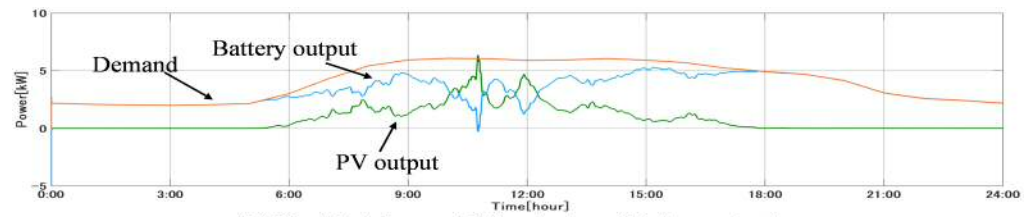


(b) DC bus voltage

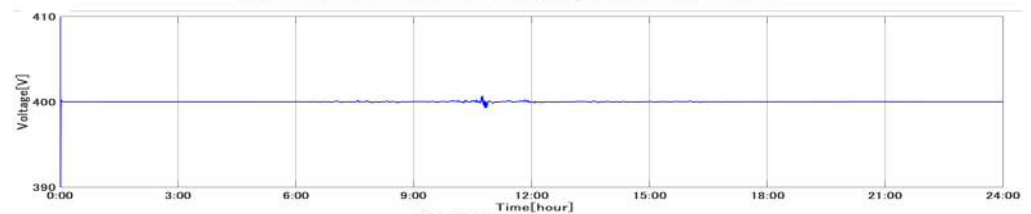


(c) State of discharge

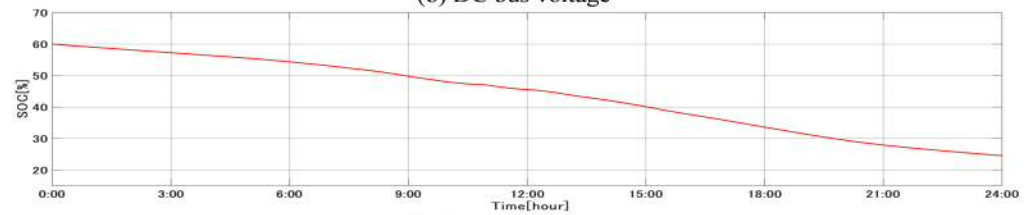
図 6.24 シミュレーション結果 (クリニック、天候：晴れ)



(a) Electrical demand, PV output, and Battery output

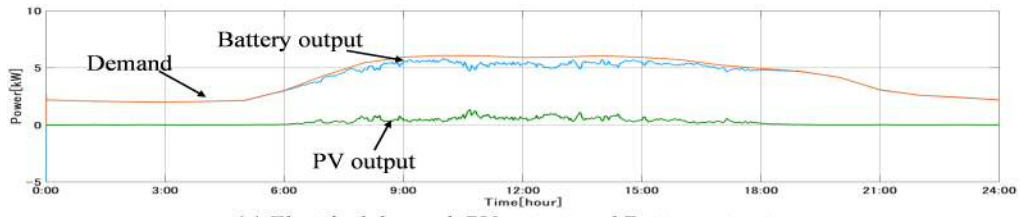


(b) DC bus voltage

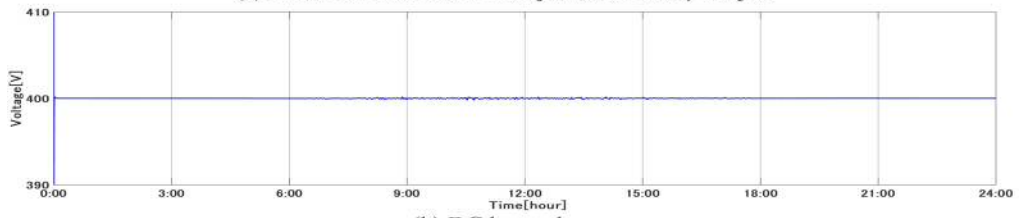


(c) State of discharge

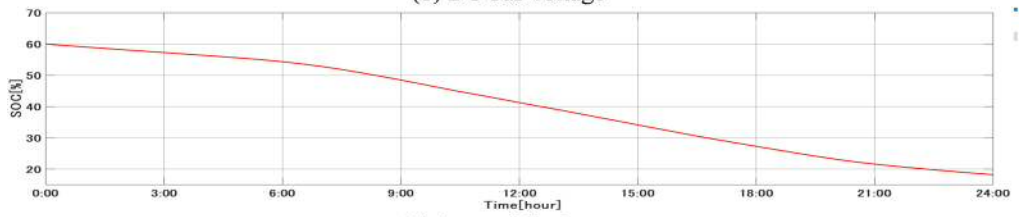
図 6.25 シミュレーション結果 (クリニック、天候：曇り)



(a) Electrical demand, PV output, and Battery output

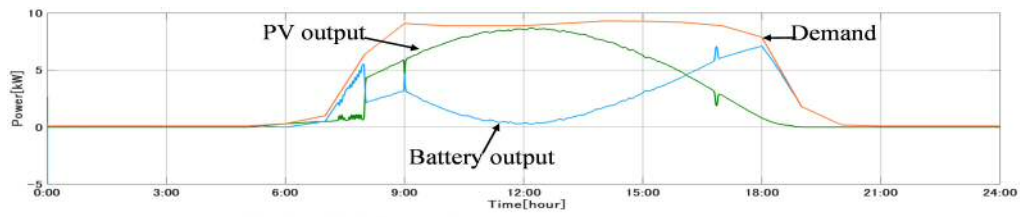


(b) DC bus voltage

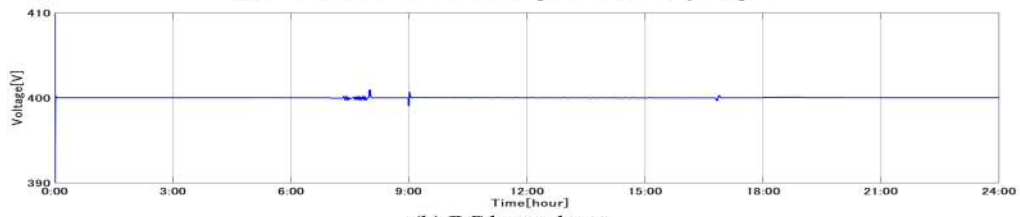


(c) State of discharge

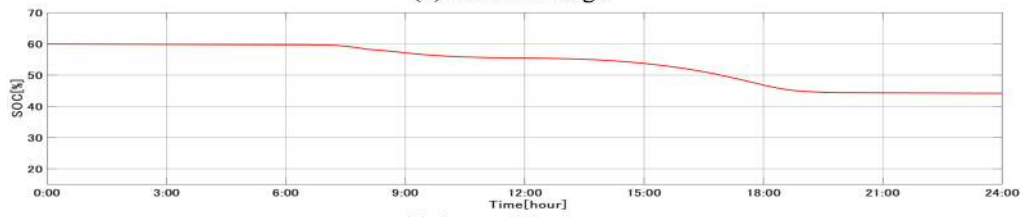
図 6.26 シミュレーション結果 (クリニック、天候 : 雨)



(a) Electrical demand, PV output, and Battery output

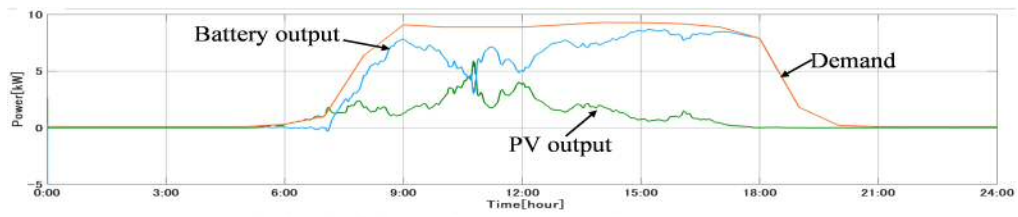


(b) DC bus voltage

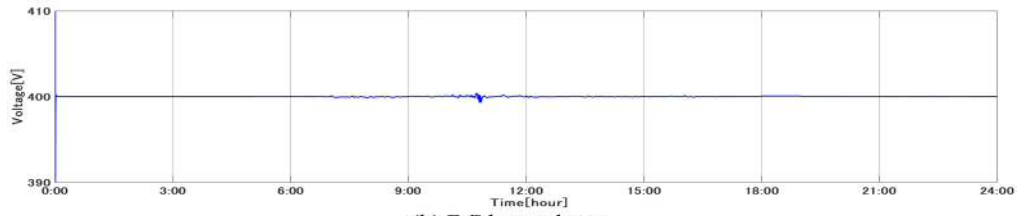


(c) State of discharge

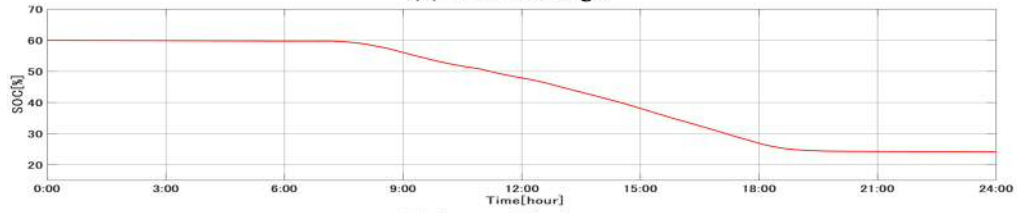
図 6.27 シミュレーション結果 (店舗、天候 : 晴れ)



(a) Electrical demand, PV output, and Battery output

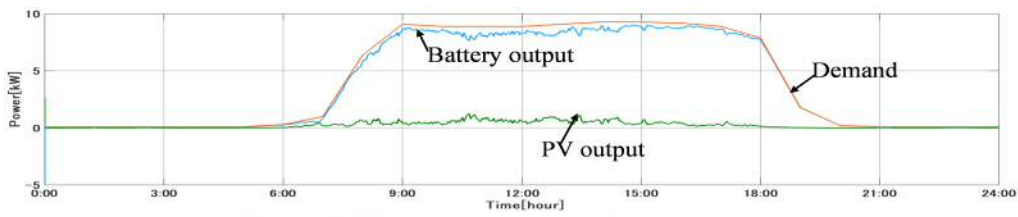


(b) DC bus voltage

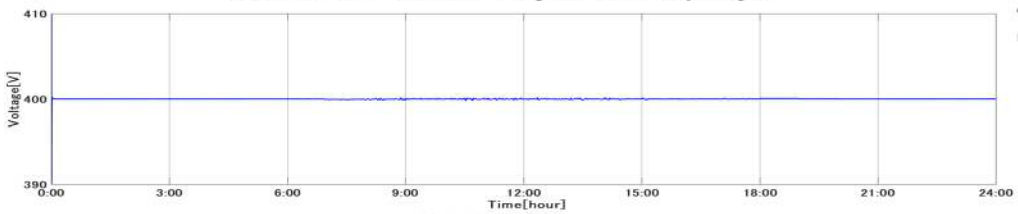


(c) State of discharge

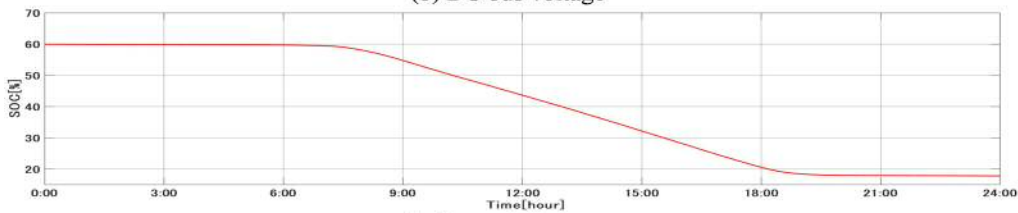
図 6.28 シミュレーション結果 (店舗、天候 : 曇り)



(a) Electrical demand, PV output, and Battery output

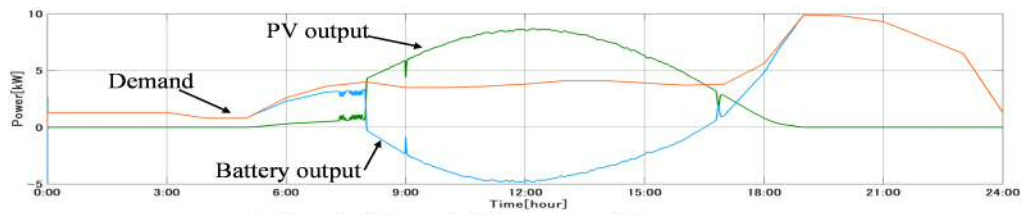


(b) DC bus voltage

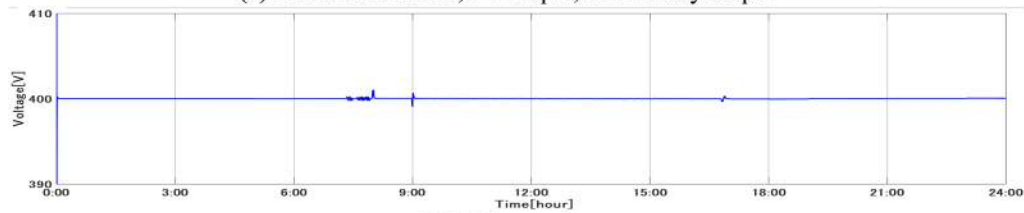


(c) State of discharge

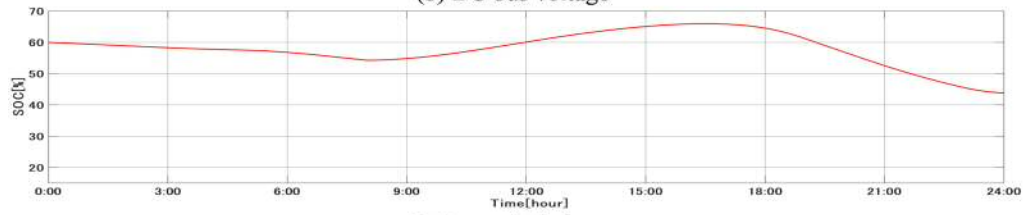
図 6.29 シミュレーション結果 (店舗、天候 : 雨)



(a) Electrical demand, PV output, and Battery output

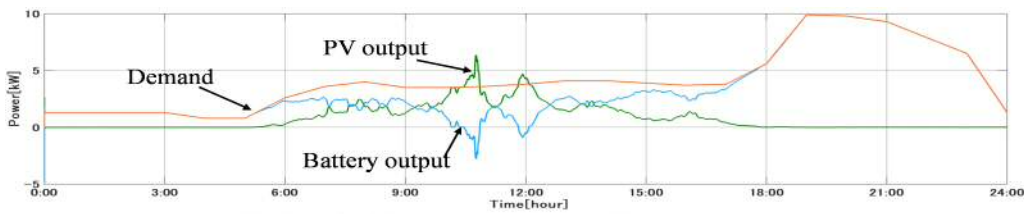


(b) DC bus voltage

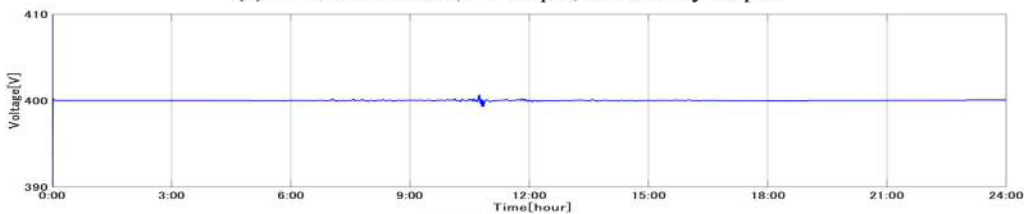


(c) State of discharge

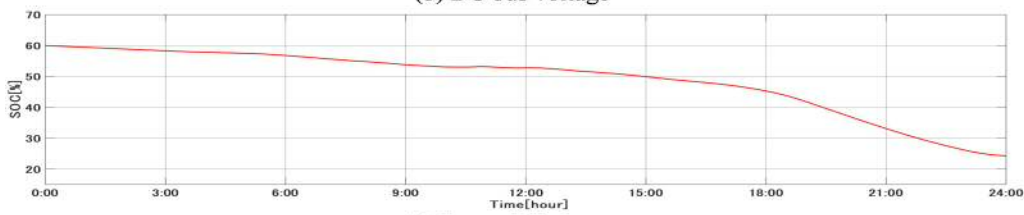
図 6.30 シミュレーション結果 (住宅、天候：晴れ)



(a) Electrical demand, PV output, and Battery output

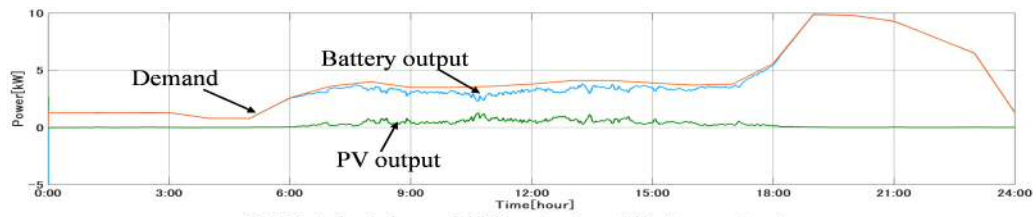


(b) DC bus voltage

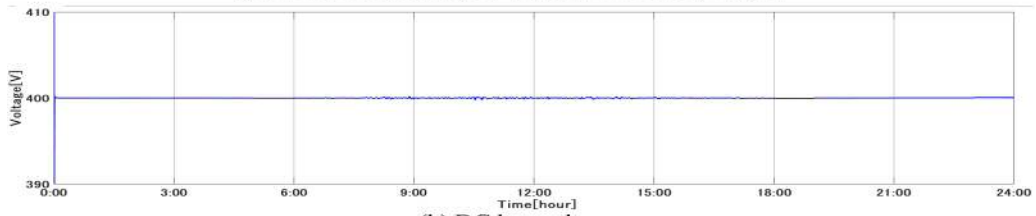


(c) State of discharge

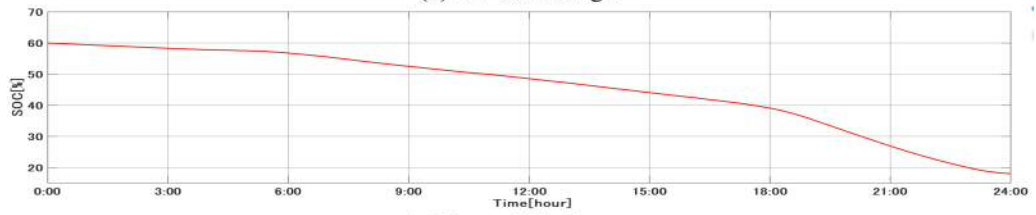
図 6.31 シミュレーション結果 (住宅、天候：曇り)



(a) Electrical demand, PV output, and Battery output

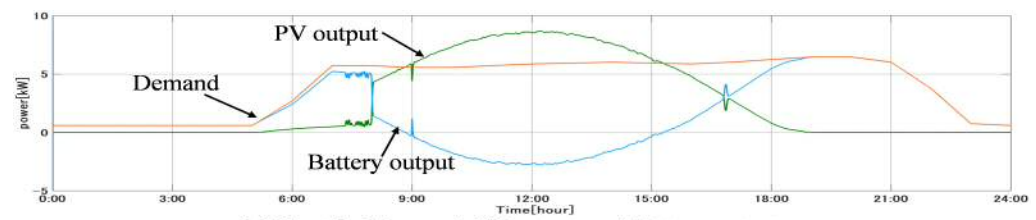


(b) DC bus voltage

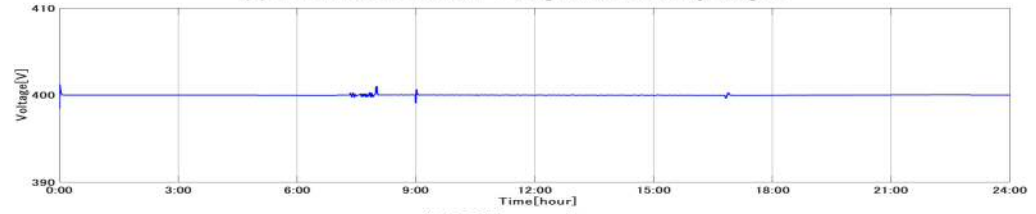


(c) State of discharge

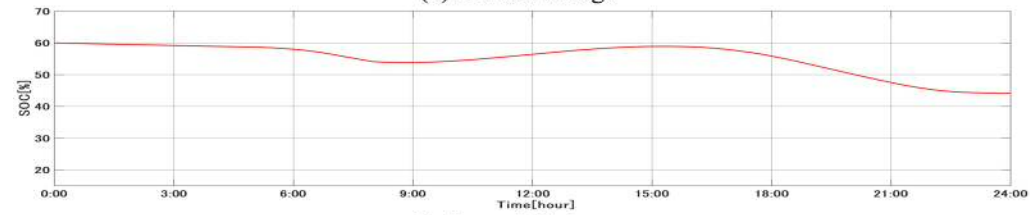
図 6.32 シミュレーション結果 (住宅、天候：雨)



(a) Electrical demand, PV output, and Battery output

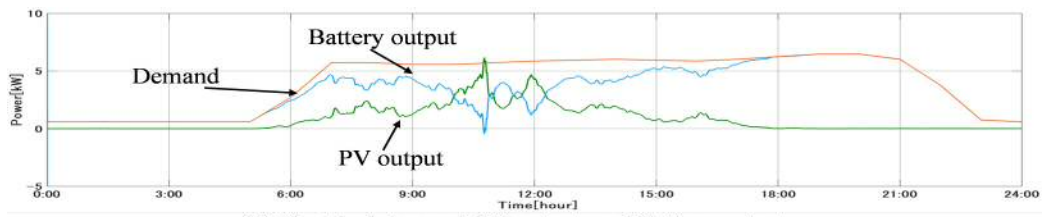


(b) DC bus voltage

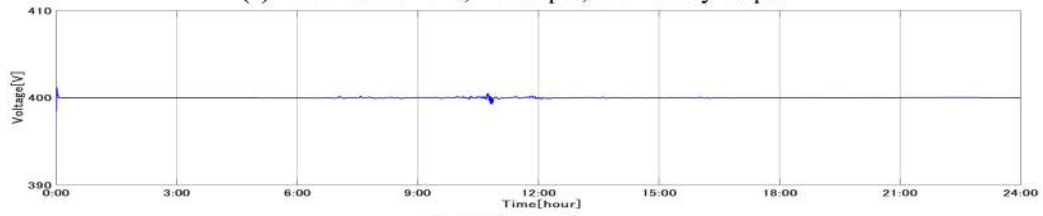


(c) State of discharge

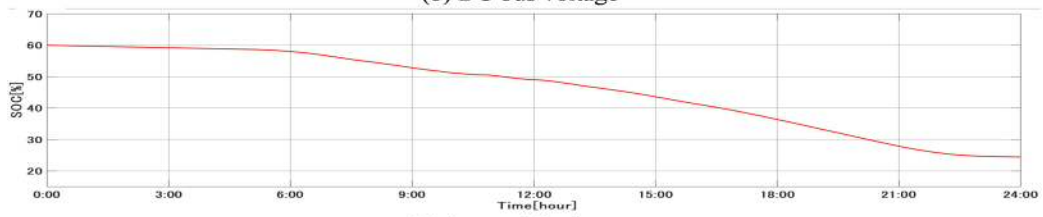
図 6.33 シミュレーション結果 (スポーツ施設、天候：晴れ)



(a) Electrical demand, PV output, and Battery output

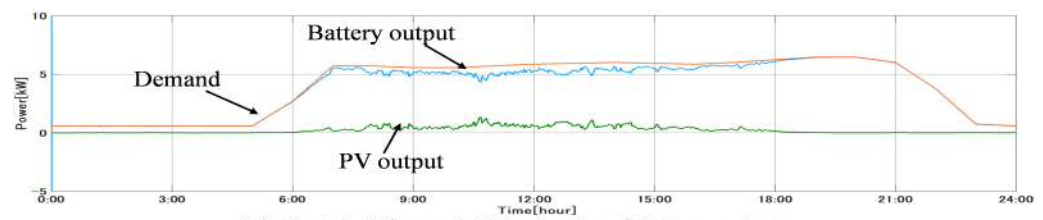


(b) DC bus voltage

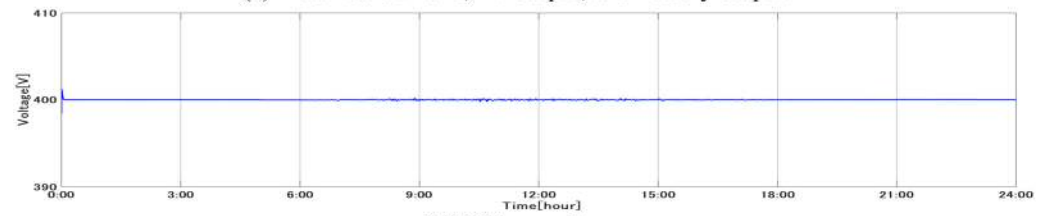


(c) State of discharge

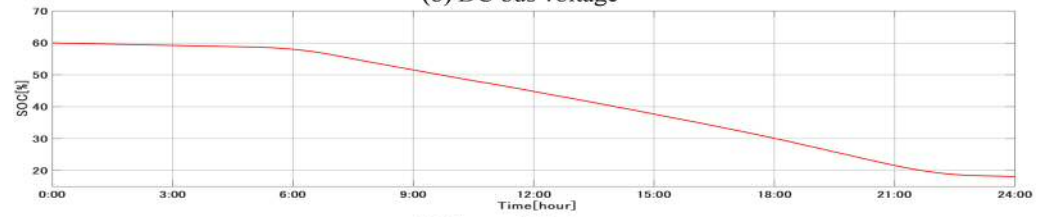
図 6.34 シミュレーション結果 (スポーツ施設、天候：曇り)



(a) Electrical demand, PV output, and Battery output



(b) DC bus voltage



(c) State of discharge

図 6.35 シミュレーション結果 (スポーツ施設、天候：雨)

6.3.4 実モデルに関する検討

○シミュレーションモデル

今までは小規模グリッドのシミュレーションを行ったが、ここでは広島大学工学部 A1 棟の建物を使ったシミュレーションを行った。今回は BCP 対策を行うため系統は考えずいつもと同じように独立システムモデルとして考える。広島大学工学部 A1 棟の屋上にある PV パネル設置図を図 6.36 に示す。また、図 6.37 に今回使用したシミュレーションモデル図を示す。

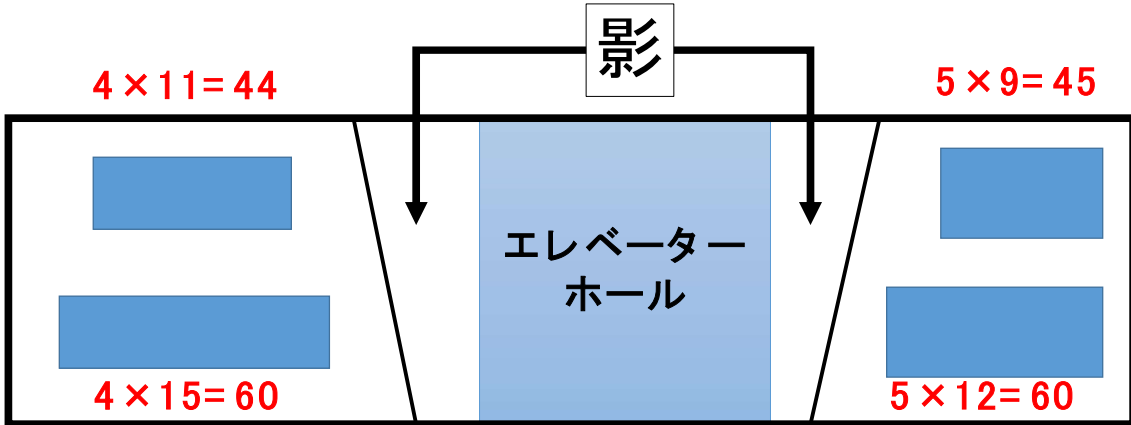


図 6.36 屋上の PV パネルの配置図

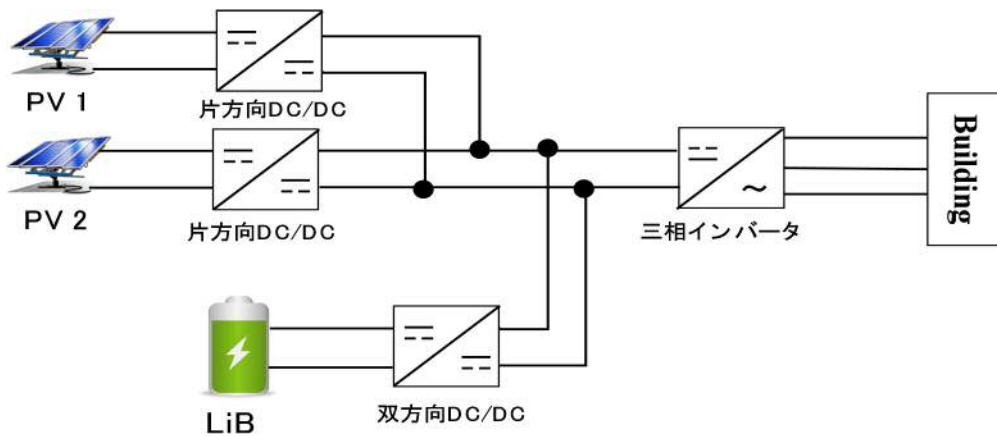


図 6.37 シミュレーションモデル図

○シミュレーション条件

【PV パネル 1】日射量と外気温度：図 6.16 に示す、開放電圧：29.7[V/module]
 短絡電流：8.6[A/module]、直列接続数：26[個]、並列接続数：4[個]

【PV パネル 2】日射量と外気温度：図 6.16 に示す、開放電圧：29.7[V/module]
 短絡電流：8.6[A/module]、直列接続数：21[個]、並列接続数：5[個]

【LiB】出力容量：1.2[kWh/個]、SOC 初期値：80[%]、公称電圧：51.2[V]
 定格放電電流：17.4[A/個]、並列接続数：9[個]

需要家負荷を図 6.38 に表す。これを地下 1F から 8F の 9 階分を考える。

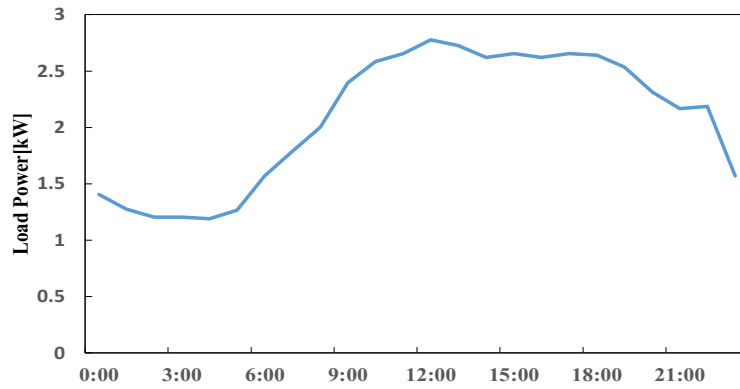


図 6.38 需要家負荷(負荷データは1階分)

○シミュレーション結果

今回は各電力と LiB の SOC の波形を図 6.39~図 6.41 にのせる。各電力波形で緑色の線を PV の発電電力、青線に LiB の充放電電力、橙線を負荷の消費電力を表す。赤線は SOC の放電状況を示す。

① 天候が晴れの時

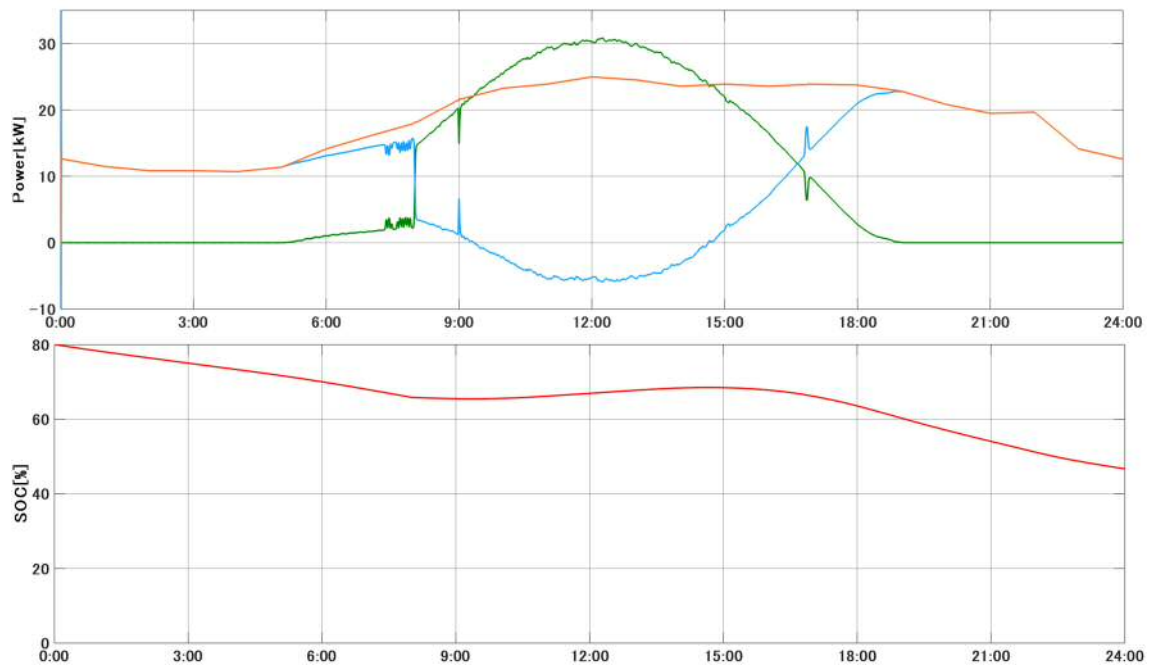


図 6.39 シミュレーション結果 (晴れ)

② 天候が曇りの時

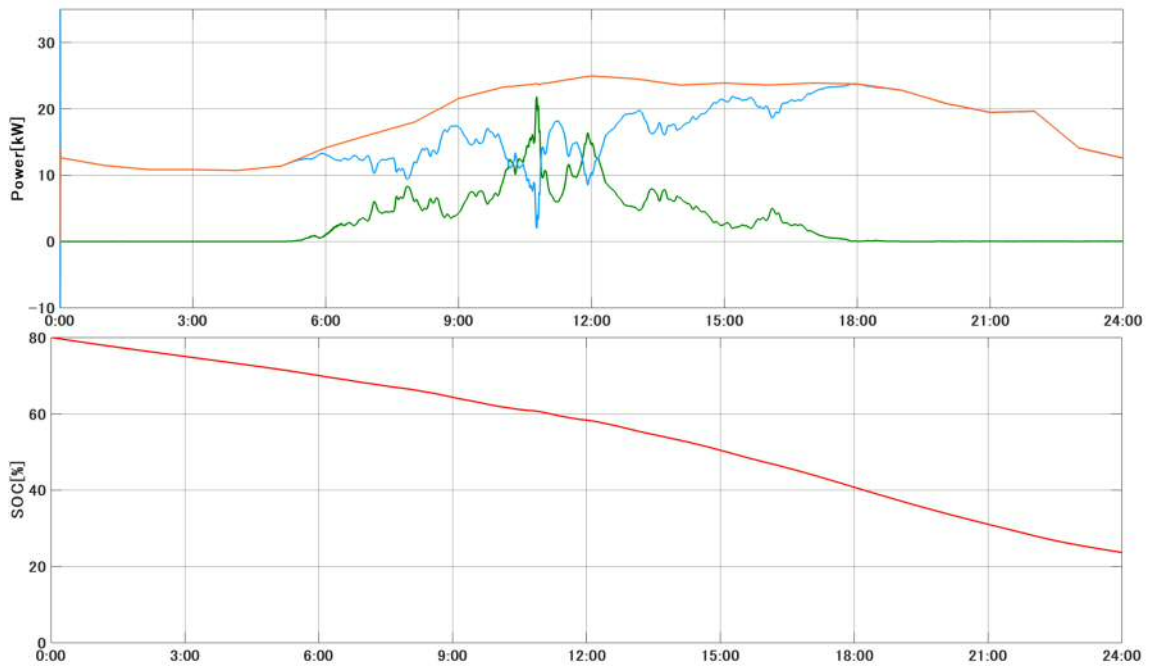


図 6.40 シミュレーション結果（曇り）

③ 天候が雨の時

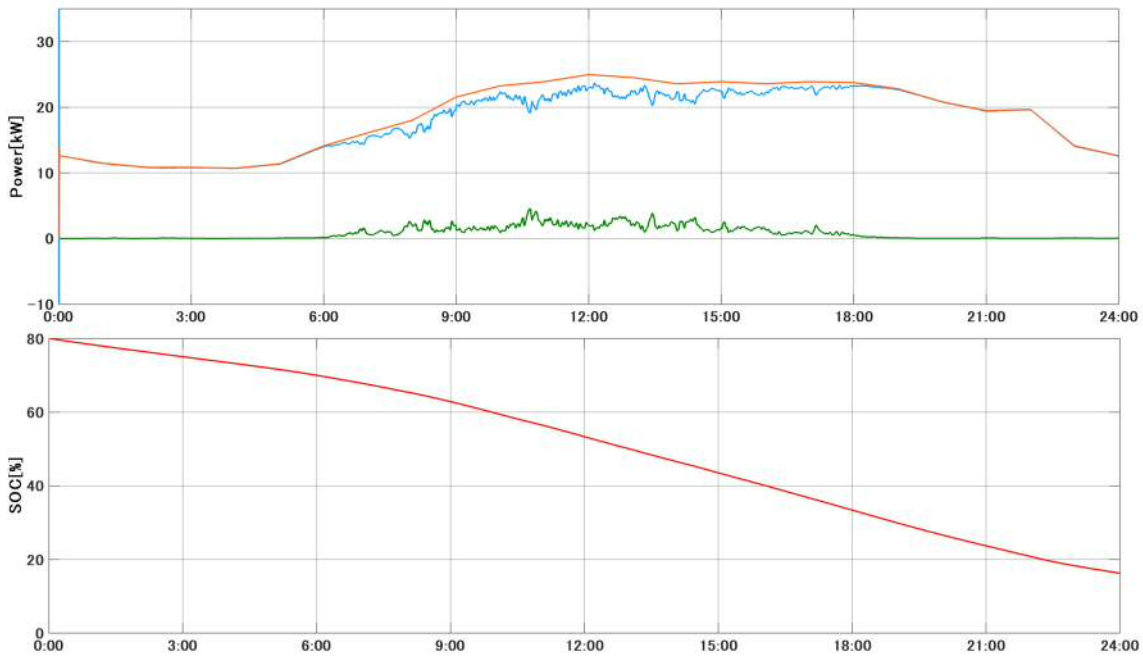


図 6.41 シミュレーション結果（雨）

PVやLiBを含む小規模なグリッドのシミュレーションにおいて、スイッチングデバイスを用いているが故に、計算時間の長時間化が問題になっていたため、スイッチングデバイスを電圧源と電流源に置き換える平均値モデル化を行うことで、計算時間の大幅な短縮が図れることを確認した。また、平均値モデルがスイッチングモデルに対して、どれだけの誤差を持っているかを相対誤差を用いて検証した。その

結果、動的シミュレーションにおいて、平均値モデルはスイッチングモデルを完璧には模擬できていないまでも、総合的に平均値モデルが優れていることが確認できた。そして、実運用需給シミュレーションを想定した24時間の長時間シミュレーションを行い、長時間のシミュレーションが現実的な計算時間で行えることを確認した。

また提案したシミュレーターでは需給バランスを満足しつつ、DCバス電圧を一定に維持できている。天候パターンにも対応でき、負荷が変わっても需給バランスが維持できている。天候によりSOCの下落割合は負荷パターンにおいてもほぼ同じ傾向であることが確認できる。

6.4 災害時の地域連系の概要

2011年3月11日に生じた東日本大震災以降、BCPへの意識が高まり、様々な取組みが行われている。それは、災害等が生じた際の生命維持の方法、ライフラインの確保は当然として、その上で例えば企業の業務継続が可能な対策を検討し、実際に設備導入が図られている。^[6.3] また、企業内のBCP策定状況は、後に生じた熊本地震以降でアンケート調査したところ、大企業では約72%の割合で策定済みで、予定なしあるいはBCPを知らないとの回答は約4%程度であった。企業規模が小さくなるほど、策定状況は低く、中小企業では10%程度に留まっている。^[6.3]

BCP対策は建物用途並びにその目的によっても対策方法や緊急性は異なり、例えば一般企業と人の生命維持に関わる病院施設とを比較すると、病院施設は災害が生じた直後にBCPの需要のピークが高く、その後時間の経過とともに落ち着きを示す。代わって、一般企業の場合は、病院施設に比べ緊急性を要することは少なく、BCPの需要は一定感を示すものと考えられる。建物用途に応じて、対策方法を検討する必要がある。

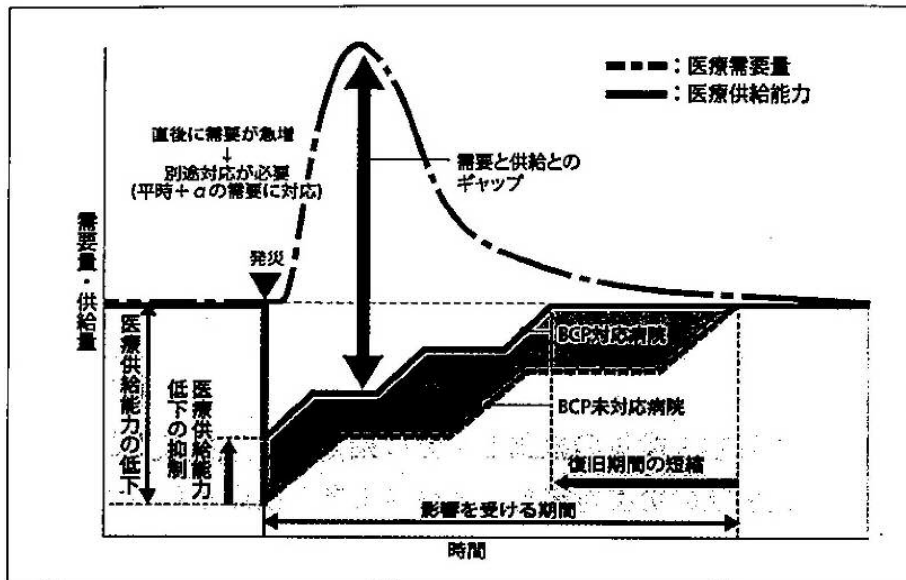


図 6.42 病院施設の BCP 概念図^[6.3]

但し、BCP対策に講じる費用は投資に利益が直結しないため、本対策がどの災害に対し講ずるかも併せて検討が必要である。国内で生じる災害で最大リスクと考えられるのは地震であり、本災害の発生頻度はどの程度のものなのか、また本災害で影響を受ける設備はどこなのか、なども検討のうえ最適なBCP対策が必要と考える。

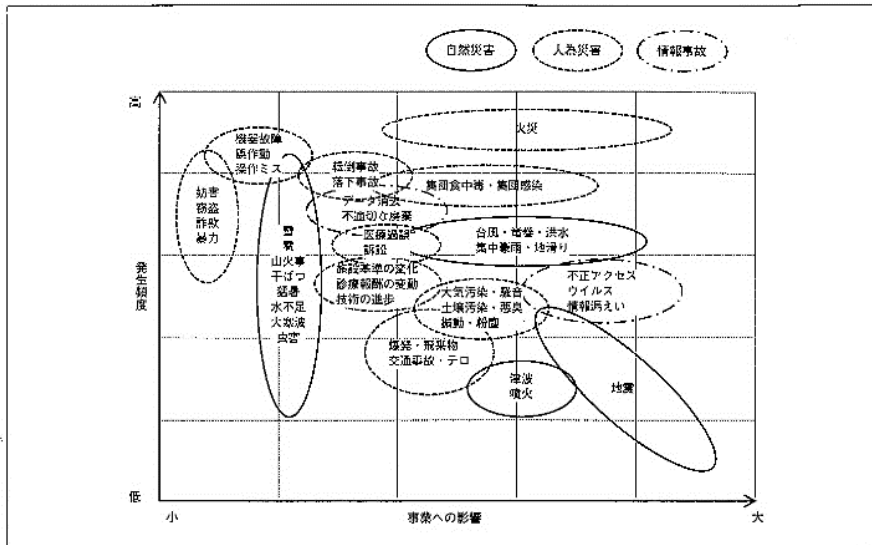


図 6.43 リスクの発生頻度と事業継続への影響^[6.3]

BCP 対策は、必ずしも事業者個体で検討する必要はなく、事業者間での電力融通や地域間連系も考えられる。既に、オフィスビルレベルでは建物間での電力融通・熱供給などを実証レベルで導入しており、スマートエネルギーネットワークと称し、その必要性が高まっている。^[6.3]

一方、海外での取り組みに目を向けると、日本の東日本大震災などを教訓にした事例もあり^[6.4]、海外でも BCP の必要性を感じている。非常用電源の確保、電力系統網の安定性など、様々な視点での研究もなされている。日本と同様、世界的にも BCP に対する意識は高く、今後ますますその必要性は高まってくるものと想定される。

6.5 地域連系を想定した EMS シミュレーション

本章では、小規模のグリッドのシミュレーションで図 6.44 に示すシミュレーションモデルを用い地域間連系を需要家 A では PV システム、LiB システム、DC/AC コンバータモデル、三相負荷モデルからなる。また、需要家 B と需要家 C は電力会社から供給される負荷である。

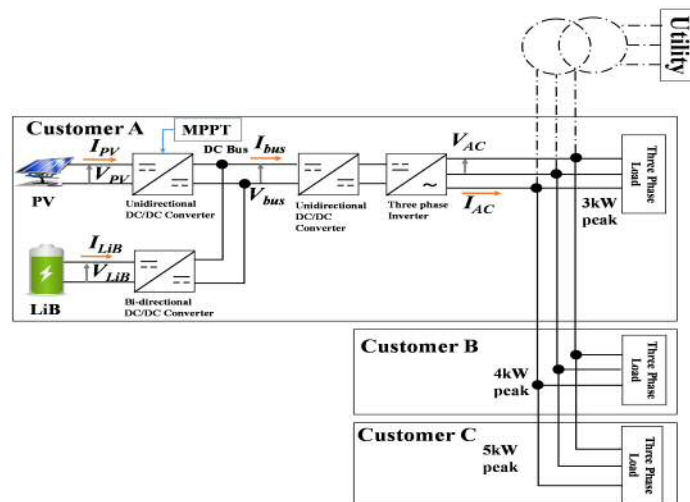


図 6.44 シミュレーションモデル図

○シミュレーション条件

図 6.44 のモデルにおいて、1 分刻みの日射量と外気温度の波形を図 6.45 に示す。このデータは広島大学工学部 A1 棟の屋上にある計測器の値を用いた。天候は晴・曇・雨の 3 パターンを想定した。PV パネルと LiB の各諸元は広島大学工学部 A1 棟の設備を参考に以下のように設置した。

【PV パネル】日射量と外気温度：図 6.45 に示す、開放電圧：29.7[V/module]

短絡電流：8.6[A/module]、直列接続数：11[個]、並列接続数：4[個]、出力容量：8.47[kW]

【LiB】出力容量：1.2[kWh/個]、SOC 初期値：80[%]、公称電圧：51.2[V]

定格放電電流：17.4[A/個]、並列接続数：3[個]

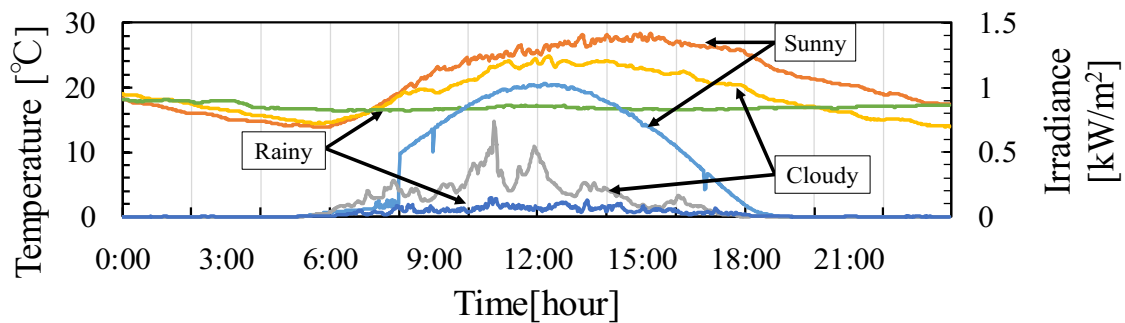


図 6.45 各天候パターンにおける日射量と外気温度

需要家負荷パターン^[3.1]は図 6.46 に示し、これは民宿などの小型施設を想定している。1 時間刻みのデータを用い線形補間している。今回は地域連系を行うので、需要家 A はホテルで、需要家 B はオフィスで、需要家 C は店舗とする。

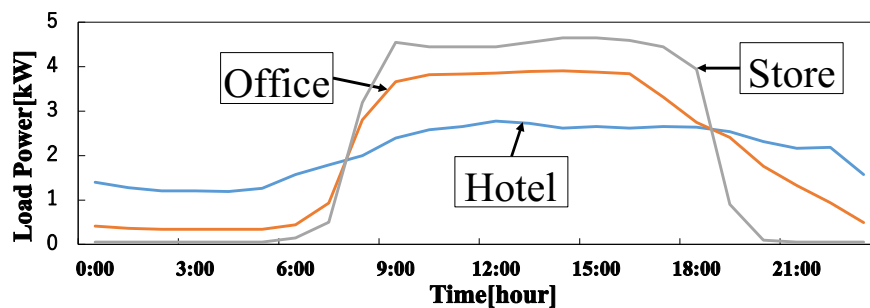


図 6.46 需要家負荷

○シミュレーション結果

まずは Customer A のみのシミュレーション結果を図 6.47～図 6.49 に示す。上の図に各箇所の電力波形を示し、縦軸は電力、横軸は時間を表す。下の図に SOC の波形を示し、縦軸に SOC、横軸に時間を表す。

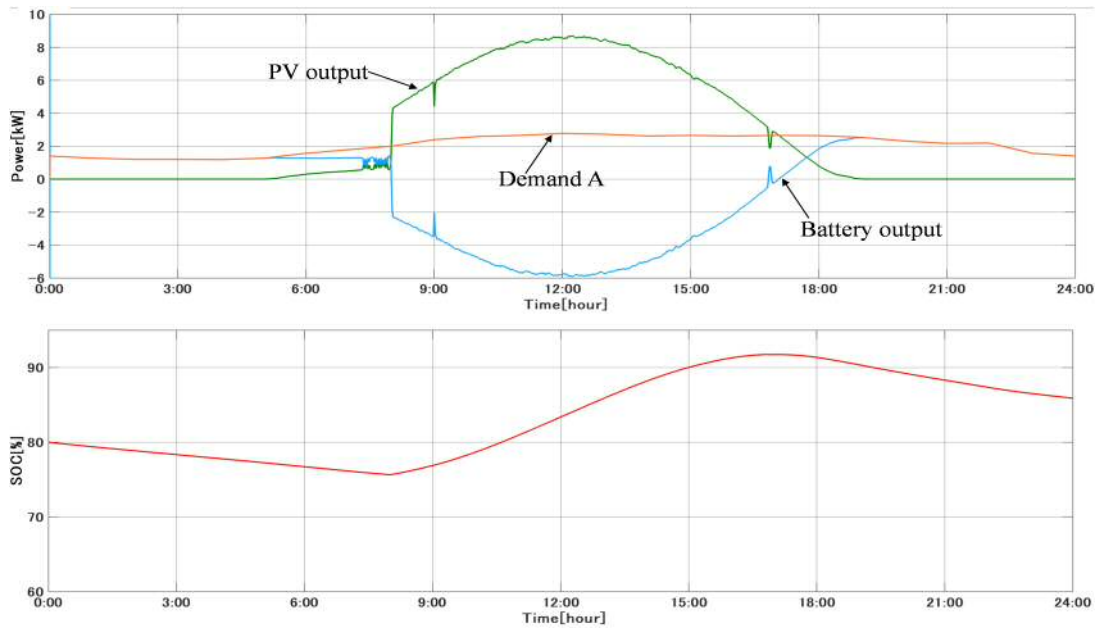


図 6.47 天候が晴れの時

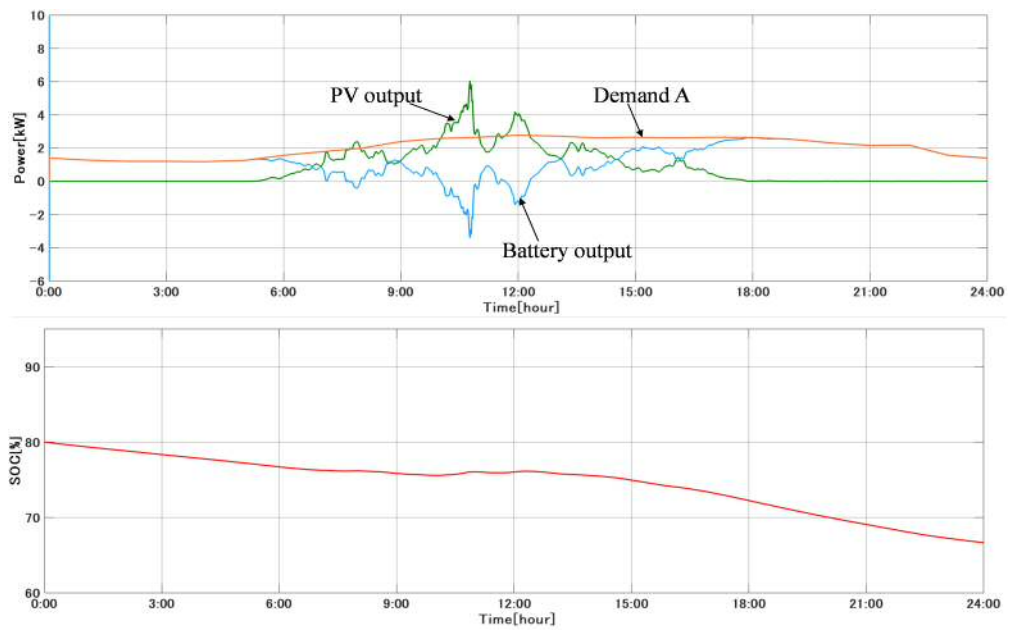


図 6.48 天候が曇りの時

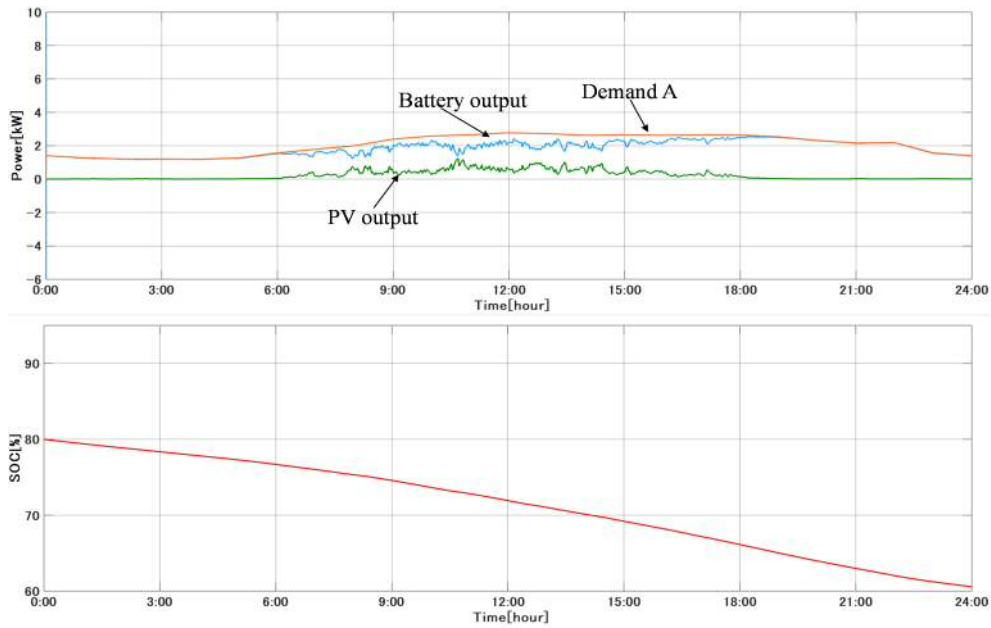


図 6.49 天候が雨の時

次に、今回行うシミュレーション結果を図 6.50～図 6.52 に示す。1 番目の図に PV の発電電力と LiB の充放電電力の波形を示す。2 番目の図にそれぞれの需要家負荷の消費電力の波形を示す。3 番目の図に電力供給した電力の波形を示す。1～3 番目の図において、縦軸は電力、横軸は時間を表す。Grid Power 1 と Grid Power 2 はそれぞれ図 6.44 より、Customer A と Customer B の間の電力、Customer B と Customer C の間の電力を表している。4 番目の図に SOC の波形を示し、縦軸に SOC、横軸に時間を表す。

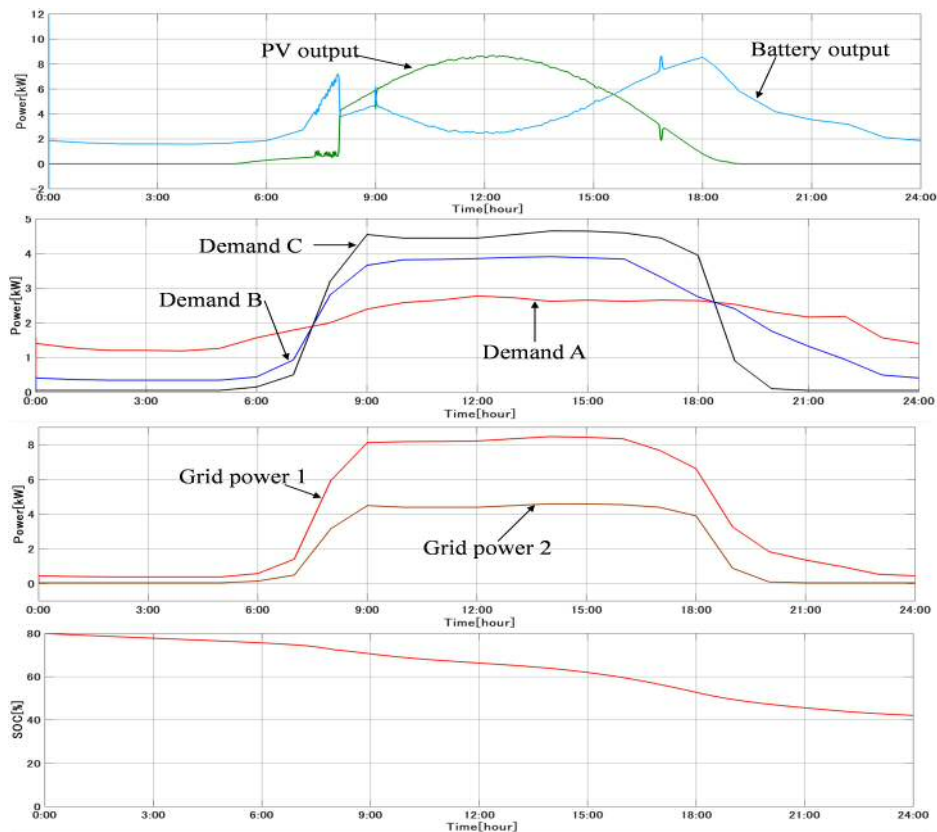


図 6.50 天候が晴れの時

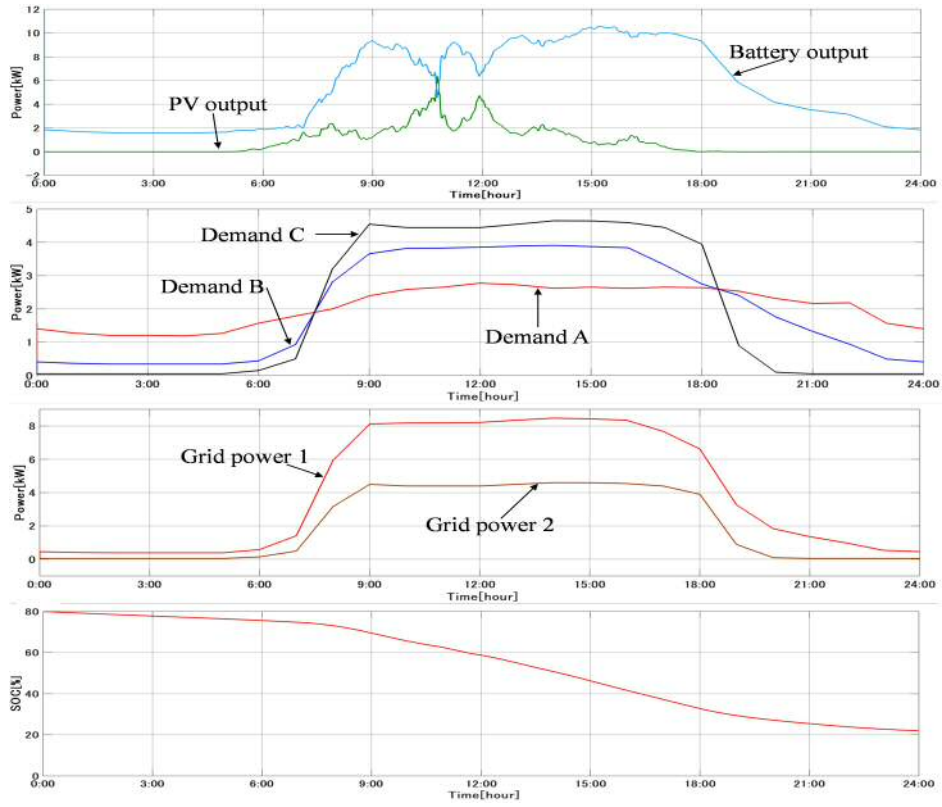


図 6.51 天候が曇りの時

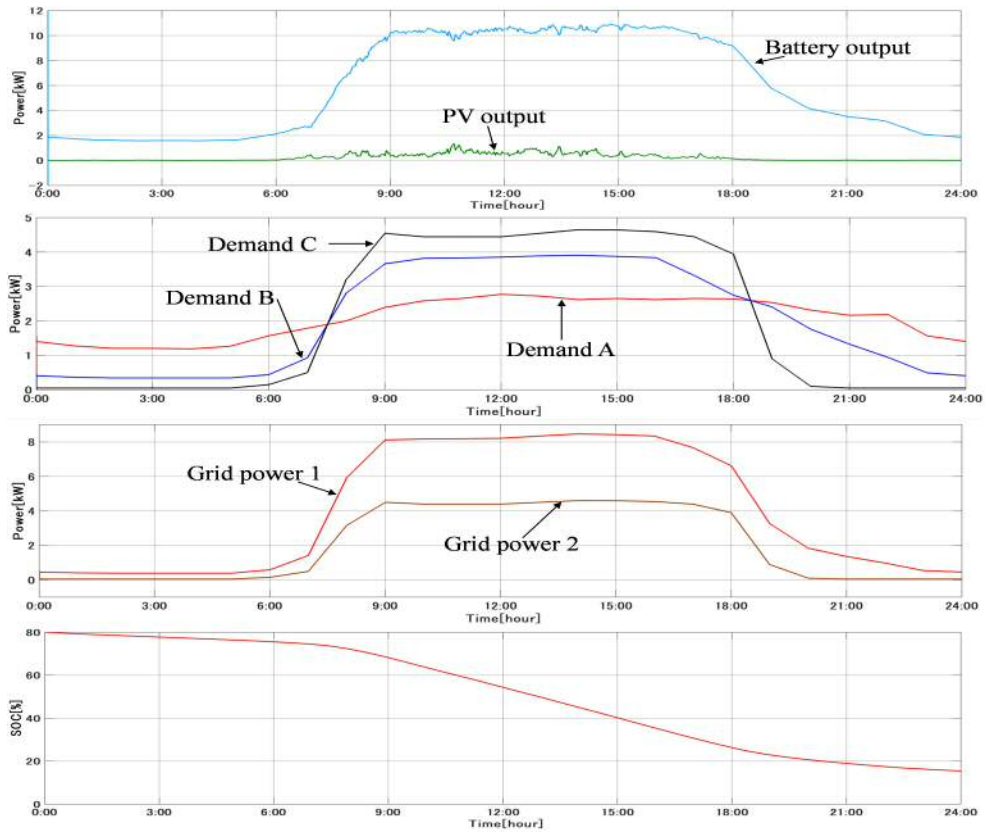


図 6.52 天候が雨の時

表 6.4 LiB の SOC の変化

	sunny	cloudy	rainy
BCP (A)	+6%	-13%	-19%
BCP (B)	+6%	-13%	-19%
BCP (C)	+6%	-13%	-19%
BCP(A and B)	-16%	-35%	-42%
BCP(B and C)	-16%	-35%	-42%
BCP(A and C)	-16%	-35%	-42%
BCP(A 、 B and C)	-38%	-58%	-65%

6.6 考察とまとめ

本章では、まず BCP とは企業が災害などの事態に遭遇した場合においても事業を継続させる方法や手段であるといった BCP の概要について説明し、東日本大震災以降、BCP の重要性が増していることについて述べた。

そして、BCP を考慮した蓄電池最適運用計画として、一定の SOC を確保しつつ、電気料金の最小化を行う BT 運用を導出した。その結果、確保する BT 容量と電気料金の間にはトレードオフの関係があり、電力不足による損失や BT イニシャルコストなどを考慮した検討が必要であることが分かった。また、BCP を考慮した EMS 制御として、平均値モデルを用いた実運用需給シミュレーションを想定した 24 時間の長時間シミュレーション、実モデルを参考にしたシミュレーションを行った。その結果、災害時に想定される独立系統という条件においても DC バスを一定に保ちつつ、需給バランスを維持できることを確認した。

また、6.5 のシミュレーション結果より提案したシミュレータでは、どの天候パターンにおいても電力会社から供給される負荷の需要家に電力供給していることが確認できた。そして LiB の SOC で 24 時間のシミュレーションした結果の変化を表 6.4 に示す。BCP(*)は*の需要家に対してのみ BCP を行うことを指す。図 6.47～図 6.52 と表 6.4 より SOC の変化の度合を確認することが出来た。

第7章 結論

本論文では、温度特性及び寿命特性を考慮した BT の最適運用計画を提案し、その結果について検証を行った。温度制約により使用温度範囲内での運用ができ、寿命劣化抑制制約によりカレンダー寿命及びサイクル寿命による劣化を抑制する運用ができることを確認した。また、制御モデルの構築を行い、安定性と性能の評価を実施した。今後は、より取組みが進む電力融通に関し、提言される課題に着目し、本モデルをベースに電力融通モデルを再構築し、検証・評価を行う予定である。

参考文献

2 章

- [2.1] 足立、廣田：「バッテリーマネジメント工学～電池の仕組みから状態推定まで～」、東京電機大学出版局 (2015)
- [2.2] 大島、荒木、恩田：「小型リチウムイオン二次電池の急速充放電時の発熱挙動」、電学論 B、Vol.124、No.12、pp.1521-1527 (2004)
- [2.3] 乾 義尚 渡瀬 祐樹 花本 武史 綾部 泰「円筒型リチウムイオン二次電池内温度・電流分布の簡易発熱モデルを用いた 2 次解析」電学論 B、124 巻 8 号、2004

3 章

- [3.1] 社団法人 空気調和・衛生工学会：「都市ガスによるコージェネレーションシステム計画・設計と評価」 1994

4 章

- [4.1] 加藤 晋也 谷口 一徹 榊原 一紀 福井 正博：「分散型電力ネットワークにおける蓄電池劣化抑制を指向した最適電力ルーティング手法」電気学会論文誌 C、第 133 巻 6 号 pp.1186-1194、2013

6 章

- [6.1] 中小企業庁編：BCP（事業継続計画）とは
(http://www.chusho.meti.go.jp/bcp/contents/level_c/bcpgl_01_1.html)
- [6.2] 間屋口 信博 山口 亮：「負荷設備容量に対する最適な太陽電池と蓄電池の組合せ手法の研究・評価」,第 25 回電気設備学会全国大会,2007
- [6.3] 電設技術 平成 29 年 9 月号
- [6.4] Demand-Side Resiliency and Electricity Continuity Experiences and Lessons Learned in Japan、 Vol.105、No.7、July2017、PROCEEDINGS OF THE IEEE
- [6.5] Business Continuity and Disaster Management、 IEEE INDUSTRY ZPPLICATIONS MAGAZINE
- [6.6] ELECTRICAL BUSINESS CONTINUITY MANAGEMENT TOWARDS A CODE、 2017 IEEE
- [6.7] Energy Management and Optimization Methods for Grid Energy Storage Systems、 IEEE ACCESS

[6.8] Field Survey of the Emergency Power Supply Related to Business Continuity、 Journal of Asian Architecture and Building Engineering/May 2009

[6.9] Networked Microgrids for Enhancing the Power System Resilience、 Vol.105、 No.7、 July2017、 PROCEEDINGS OF THE IEEE

[6.10] Switching Procedures and Business Continuity Management The Flock Logic of Multiple Source Systems、 IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS、 VOL. 52、 NO. 1、 JANUARY/FEBRUARY 2016

付録

[付.1] 電気化学会エネルギー会議 電力貯蔵技術研究会「大規模電力貯蔵用蓄電池」日刊工業新聞社 p200~202 2011

[付.2] 北側 友貴 瀬川 明大 福井 正博：「蓄電池冷却のモデル化と検証」DA シンポジウム、 Information Processing Society of Japan 2014

謝辞

本研究を遂行するにあたり、まずは電力・エネルギー工学研究室へ暖かく迎え入れて頂いた餘利野直人教授を始め、関係方々に感謝申し上げます。また、研究を進めていくにあたりましてご指導・ご助言頂き、餘利野直人教授、造賀芳文准教授、佐々木豊助教には大変感謝しております。本当にありがとうございました。更に、在学中は同じゼミの一員として研究を共にした、山本友喜君、嶋村悠太君、谷岡佳紀君にも感謝申し上げます。彼らとともに研究できたからこそ、本論文があるものと思います。皆さん、本当にありがとうございました。

引用既発表文献

I. 学術論文誌等掲載論文

1. 佐々木豊・嶋村悠太・山本友喜・餘利野直人・造賀芳文・間屋口信博：「太陽光発電・蓄電池導入を目的とした需要家向け EMS シミュレータの開発～蓄電池内部温度制約の考慮～」，電気設備学会論文誌，Vol.39, No.7, pp41-49, 2019.

2. 間屋口信博・餘利野直人・嶋村悠太・谷岡佳紀・佐々木豊・造賀芳文：「太陽光発電および蓄電池を含む HEMS 運用計画に関する研究」，電気学会論文誌 B, Vol.139, No.4, pp1-46, 2019.

II. 国際学会講演論文

1. Yoshiki Tanioka, Nobuhiro Mayaguchi, Yutaka Sasaki, Naoto Yorino, Yoshifumi Zoka: "Development of An Energy Management System Simulator for Analyzing Business Continuity Plan, " 2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Asia (ISGT Asia 2018), Session OR-0033, Singapore, May 22-25, 2018.

2. Nobuhiro Mayaguchi, Naoto Yorino, Yoshifumi Zoka, Yutaka Sasaki, Yuta Shimamura:

“OPTIMUM OPERATION PLAN OF STORAGE BATTERY IN CONSIDERATION OF TEMPERATURE AND LIFE CHARACTERISTICS, ” Grand Renewable Energy 2018 (GRE2018), Session a90313, Yokohama, Jun 17-22, 2018.

3. Nobuhiro Mayaguchi, Yuta Shimamura, Yutaka Sasaki, Yoshifumi Zoka, Naoto Yorino: “Optimal Operation Planning of Storage Battery in Consideration of Its Temperature and Lifetime Characteristics, ” International Conference on Electrical Engineering 2018 (ICEE2018), Session G3-1733, KOREA, Jun 24-28, 2018.

付録

1. 画面構築

1.1 GUI ツールの開発

MATLAB に備え付けられているアプリ作成用ソフト GUIDE を用いて画面構築を行う。図 1 のようにドラッグ・アンド・ドロップにより、簡単にレイアウトを作成することができる。その後、図 2 のように、レイアウト内のプログラムを書き込み、最適化計算プログラムと画面上のボタンやグラフとのリンクをつなぐことで、簡単な GUI を作成することができる。

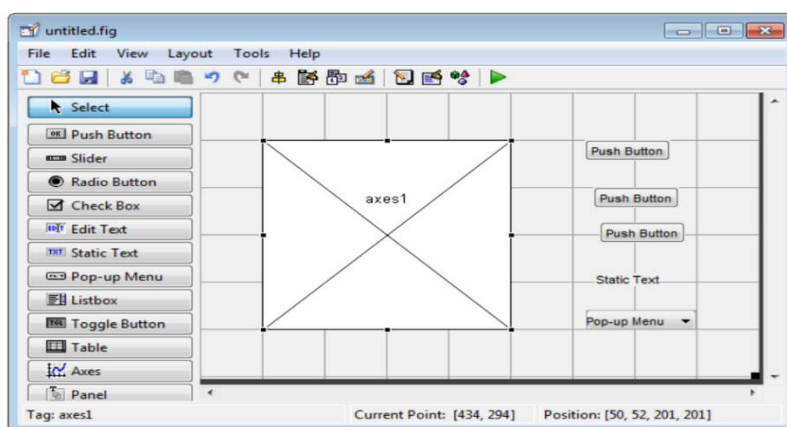


図 1 GUIDE 操作画面

```
function Bmax_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to Bmax (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Bmax as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Bmax as a double
Bmax = str2double(get(hObject, 'String'));
if isnan(Bmax)
    set(hObject, 'Strings', 0);
    errorDlg('Input must be a number','Error');
end

% Save the new density value
handles.Bmax = Bmax;
guidata(hObject,handles)
```

図 2 蓄電池容量書き込み部分

1.2 構築画面

構築画面を以下に示す。図3が基本入力画面、図4が詳細入力画面、図5結果画面である。

・基本入力画面

基本入力画面は、①各種パラメータ設定②需要家、料金プラン、地域設定③運用モードの3つ要素で構成される。①各種パラメータ設定では、BT容量やPV容量などの基本的なパラメータを数値で入力する形となっている。②需要家、料金プラン、PV容量では、予め設定された項目をポップアップメニューで表示させ、使用者に選択してもらう形となっている。電気料金プランで各時刻の電気料金、需要家負荷で各時刻の需要家消費電力量、地域設定で各時刻の日射量と外気温を設定する。③運用モードではBTの運用モードを設定する。経済優先モードではPV余剰電力を全て売電し、需要家の電気料金を最小化する。環境優先モードではPV余剰電力をBTに優先して充電するという条件のもとで需要家の電気料金を最小化する。BCP優先モードでは、常に一定のSOCを保持しつつ蓄電池を運用するモードである。保持するSOCは使用者が入力する。詳細入力をしない場合は、画面下部の実行ボタンを押すことでシミュレーションが開始する。

各種パラメータ			
蓄電池容量 (1モジュール)	1.2	kWh	並列数 3 直列数 1
充電料金	31	円/kWh	PV容量 15 kW
蓄電池公称電圧 (1モジュール)	512	V	部屋の体積 40 m ³
考察期間	1	日	部屋の内壁表面積 80 m ²
PV設備費用単価	367	万円/kWh	BT設備費用単価 20 万円/kWh

需要家, 料金プラン, 地域設定	
電気料金プラン	エコナイトプラン
需要家負荷	事務所
1日の総消費電力	52.032 kWh
地域設定	広島 冬

運用モード	
<input checked="" type="radio"/> 経済優先モード	
<input type="radio"/> 環境優先モード	
<input type="radio"/> BCP優先モード	SOC下限 10 %

詳細設定

実行

図3 基本入力画面

・ 詳細入力画面

詳細入力画面は、蓄電池の内部抵抗や熱容量などの使用者による設定が難しいパラメータの入力画面である。ある程度は、基本入力内の BT 容量や部屋の大きさでパラメータは設定されるが、より詳細にパラメータ設定をする場合はこの画面で入力して設定することもできる。

詳細入力					
最大充電電力	<input type="text" value="3.6"/>	kW	最大放電電力	<input type="text" value="3.6"/>	kW
蓄電池表面積	<input type="text" value="0.7692"/>	m ²	蓄電池内部抵抗	<input type="text" value="0.455111"/>	Ω
熱伝達係数	<input type="text" value="20"/>	W/m ² K	蓄電池熱容量	<input type="text" value="24480"/>	J/K
SOC下限	<input type="text" value="10"/>	%	SOC上限	<input type="text" value="90"/>	%
充放電効率	<input type="text" value="90"/>	%	熱貫流率	<input type="text" value="0.6"/>	W/m ² K
周囲温度下限	<input type="text" value="0"/>	℃	空気の熱容量	<input type="text" value="56303.8"/>	J/K
保存劣化係数	<input type="text" value="0.0532"/>		サイクル劣化係数	<input type="text" value="0.0005"/>	
充放電サイクル数上限	<input type="text" value="10000"/>		周囲温度上限	<input type="text" value="40"/>	℃
<input type="button" value="OK"/>					

図 4 詳細入力画面

・結果画面

結果画面ではシミュレーションの結果が表示される。上段のグラフでは買電量、売電量、需要家負荷、PV出力が表示される。中段では、BT残容量、充放電量が表示される。下段ではBT温度、周囲温度、外気温が表示される。画面下部には電気料金とシミュレーション計算時間が表示される。

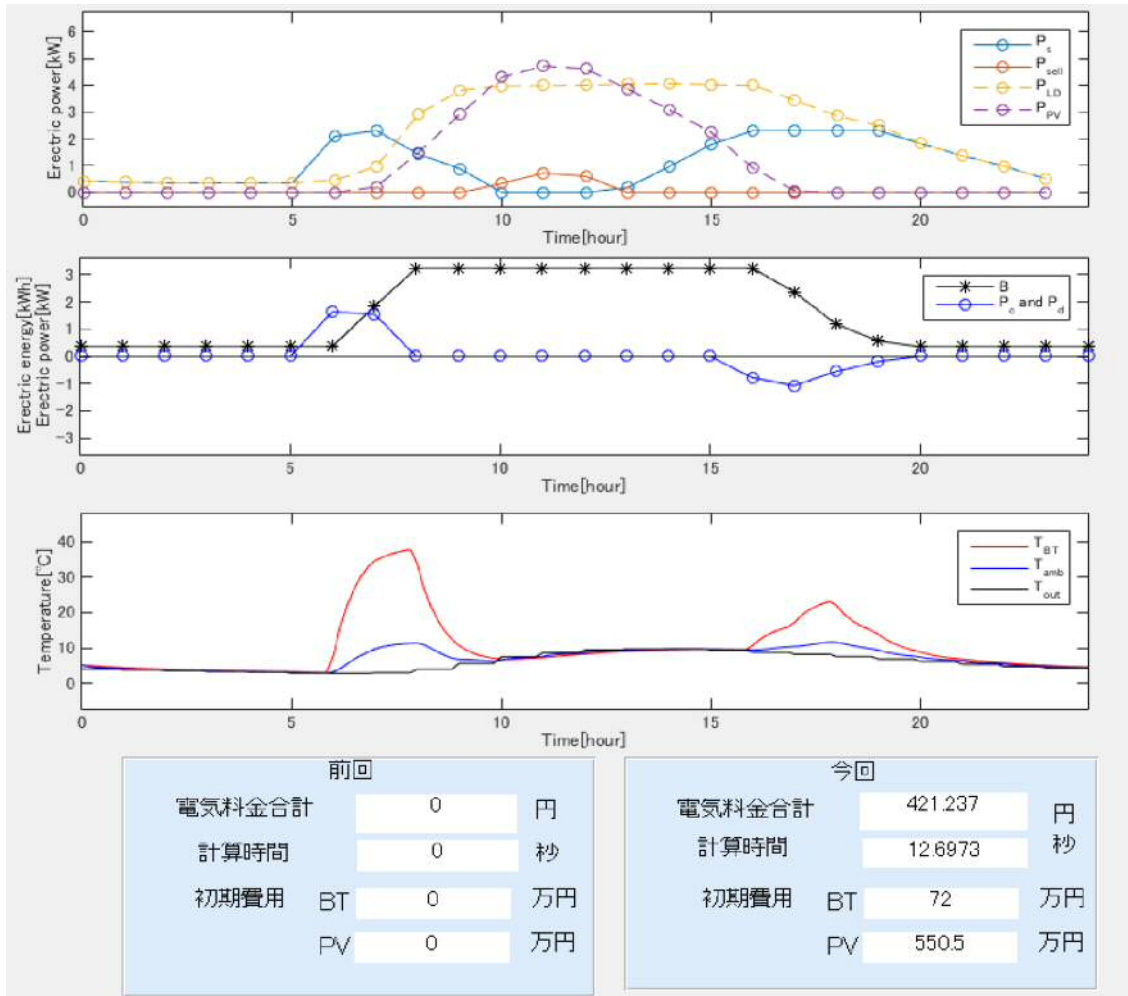


図5 結果画面

ツール起動後から実行までの操作フロー

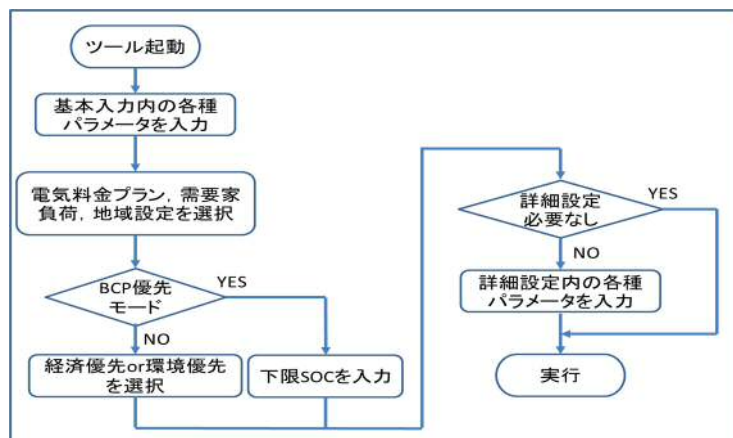


図6 操作フロー図

1.3 基本入力から詳細入力の算出

基本入力内の BT 容量や部屋の体積などの情報から詳細入力内の情報を更新するように設定している。以下に、詳細入力内情報の導出式を示す。

[内部抵抗]

$$R = r \cdot \frac{n_{1,seri}}{n_{1,para}} \cdot \frac{n_{2,seri}}{n_{2,para}} \quad (1)$$

$$r = 0.13 \cdot \frac{Ah}{1.8} \quad (2)$$

R : BT 内部抵抗[Ω] r : 単セルの内部抵抗[Ω] Ah : 単セル容量[Ah]

$n_{1,seri}, n_{1,para}$: BT 1 モジュール内の並列数、直列数

$n_{2,seri}, n_{2,para}$: BT モジュールの並列数、直列数

(1)式のように単セルの内部抵抗を元に BT 内部抵抗を導出する。また、単セルの内部抵抗は、文献[2.3]に記載されている小型リチウムイオン電池(=1.8[Ah])の内部抵抗値(=0.13[Ω])から算出する。単セルの内部抵抗は単セルの容量に比例すると仮定すると、(2)式のように求めることができる。

[空気の熱容量]

$$C_{amb} = 1.166 \cdot V_o \cdot 1006 \quad (3)$$

V_o : 部屋の体積[m³]

(3)式のように、部屋の体積 V に空気の密度(=1.166[kg/m³])と比熱(1006[J/(kg·K)])をかけることで空気の熱容量を求めることができる。

[最大充放電電力]

$$P_c^{\max} = P_d^{\max} = \frac{B_{\max}}{\text{hour}} \quad (4)$$

広島大学地下の BT 仕様を参考に、最大充放電電力は 1 時間で放電が終了する値(=1C)と設定する。

[BT 表面積]

$$A = A_{hi} \cdot \frac{V}{V_{hi}} \quad (5)$$

$$V = \frac{B_{\max}}{83.1} \quad (6)$$

A_{hi} : 広島大学 BT 表面積[m²]

V_{hi} : 広島大学 BT 体積[m³]

広島大学 BT の体積エネルギー密度(≒83.1[kWh/m³])を参考に、BT 容量から BT 体積を求め、広島大学 BT と相似の直方体と仮定した場合の表面積を計算する。

[BT 熱容量]

$$C_{BT} = \frac{B_{\max}}{0.1} \cdot 680 \quad (7)$$

文献[付.1]の重量エネルギー密度(=0.1[kWh/kg])と文献[付.2]の小型リチウムイオン電池の比熱(=680[J/(kg·K)])を用いることで、BT 熱容量を求めることができる。