



車載蓄電池を有するビル内マイクログリッドにおける電力供給の可用性設計

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-12-23 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 木村, 祥子, 薄, 良彦, 石亀, 篤司 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10466/00017197

車載蓄電池を有するビル内マイクログリッドにおける
電力供給の可用性設計木村 祥子^{†a)} 薄 良彦^{†b)} 石亀 篤司[†]

Availability Design of Power Supply for a Building Microgrid with In-Vehicle Battery

Shoko KIMURA^{†a)}, Yoshihiko SUSUKI^{†b)}, and Atsushi ISHIGAME[†]

あらまし 本論文では、車載蓄電池を有するビル内マイクログリッドにおける電力供給の可用性を検討する。電力供給の可用性とは、対象とするグリッドにおいて発電要素から負荷要素へ過不足なく電力供給を実行する能力と定義される。本論文では、可用性の評価指標（稼働率）を事前に設定した値以上に確保することを目的として、マイクログリッド内の分散電源の運用方策を提案する。具体的には、事前に設定した値以上の稼働率を確保できるように、モデル予測制御を基に分散電源の出力を決定する。オフィスビル及び電気自動車の実測データを用いた数値シミュレーション並びに実機シミュレーションにより、提案方策の有効性を示す。

キーワード マイクログリッド, 車載蓄電池, 可用性, モデル予測制御

1. ま え が き

本論文は、車載蓄電池を有するビル内マイクログリッドにおける電力供給の可用性を制御問題として検討するものである。Vehicle-to-Grid (V2G) [1]~[3]と称される技術として、電気自動車 (Electric Vehicle; EV) に搭載された二次電池 (車載蓄電池) よりビル内マイクログリッドへ電力を供給するシステムが近年検討されている。ここで、EV は本来移動手段として用いられることから、EV がビル内マイクログリッドへ電力供給が可能であるかは時間的に変化する [4]。また、対象とするビル内マイクログリッドに太陽光発電などの再生可能エネルギーに基づく分散電源が導入されている場合、それらの出力はビルを取り巻く不確定な物理環境に依存する。以上より、対象となるビル内マイクログリッドは不確定な環境変化の下で動作することになる。本論文では、このような車載蓄電池を有するビル内マイクログリッドにおける電力供給を対象とする。

本論文における電力供給の可用性を定義する前に、

工学システムの可用性 (Availability) について概説する。文献 [5] では、Availability を「アベイラビリティ」と訳し、鉄道に関わる装置やシステムが要求された機能を所定の時間中に継続して実行することが可能な能力と定義している。ここで定義されているアベイラビリティは、MTBF (平均故障間隔) 及び MTTR (平均修理時間) より $MTBF/(MTBF + MTTR)$ として量化される。また、文献 [6] では、工学システムの運用データに基づいて、 $Operating-Time/Calendar-Time$ 若しくは $Operating-Time/(Operating-Time + Down-Time)$ と Availability が定義されている。ここで、Calendar-Time は検討対象のシステムの運用を行う期間全体を示し、Operating-Time はシステムが実際に運用できた (稼働した) 期間を示す。また、Down-Time はシステムがメンテナンス及び故障により運用できなかった期間を示す。上述より、工学システムの可用性は対象となるシステムを実際に運用した事後に従来分析されてきた。

本論文の目的は、ビル内マイクログリッドにおいて設計段階で事前に設定した電力供給の可用性を確保する分散電源の運用方策を提案することにある。エネルギーシステムやエネルギーマネジメントシステム (EMS) の可用性に着目した解析や設計の重要性が議論されている [7], [8]。前段の概説より、ビル内マイクログリッドにおける電力供給の可用性は、発電要素 (電

[†] 大阪府立大学大学院工学研究科, 堺市
Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University, Sakai-shi, 599-8531 Japan

a) E-mail: ypsilon753@gmail.com

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

DOI: 10.14923/transfunj.2020JAP1003

源)から負荷要素へ過不足なく電力供給を実行する能力と定義できる。これを踏まえて、本論文では可用性の新規の評価指標である「稼働率」を、対象とするグリッドの運用期間全体のうち、電源から負荷へ過不足なく電力供給が実行された時間の割合と定義する。ただし、電力供給の対象(負荷)の消費電力が0kWの場合は除外する。これは、消費電力が0kWの場合、需要自体が発生していないためであり、供給と需要の一致に基づいて定義される稼働率の検討から除外する。不確定な環境下のビル内マイクログリッドにおいて、電力供給の可用性を事前に確保する設計、具体的には事前に設定した稼働率以上を確保する運用方策は、筆者の知る範囲において新規である。

このような電力供給の可用性の確保は、商用電源がトリップした場合のように、平常時とは異なる自立型のマイクログリッド等の電力が限られる状況において重要な問題となる。2018年北海道胆振東部地震に伴う全域停電[9]を契機として、商用電源から自立した場合のビル内電力供給の事業継続性(BCP)に注目が集まっている[10]~[12]。このBCPの観点において、稼働率を考慮すべき負荷には、避難施設や計算機サーバなどのように電力供給の継続が必須である最重要な負荷に加えて、負荷の供給するサービスを維持しながら断続的な電力供給を許容する負荷がある(注1)。

本論文では、事前に設定した稼働率を確保するための分散電源の運用方策をモデル予測制御(Model Predictive Control; MPC)[15]~[17]に基づき提案する。MPCの特徴であるグリッドの状態の未来予測を活用することにより、事前に設定した稼働率を確保するための運用方策が決定できることを示す。V2GによるEVの需要を考慮した上でMPCを制御システム設計に用いた文献は、例えば[18]があるものの、エネルギーコ

(注1)：例えば、無停電電源装置やノートパソコンといった蓄電池を併設した負荷では、前述の最重要負荷のように継続的な電力供給は必要とされず、その負荷のサービスが維持できるように断続的に正の電力供給を行えば十分である。無停電電源装置の場合は、瞬時電圧低下などが突発的に発生した場合に短期間対応できるように蓄電池の充電深度を適切に維持すればよく、このためにある期間定められたkWで充電を行うものであり、必ずしも常時電力供給を必要としない。瞬時電圧低下が発生している期間、無停電電源装置は外部からの電力供給を受けないので、稼働率100%の負荷ではない。またノートパソコンの1日当たりの平均の消費電力は文献[13]より0.2から0.5kWとすると、0.6kW電力を本論文で定義する稼働率30%で供給することにより(5.2を参照)、24時間継続的に電力供給を受けなくとも負荷としてのサービスは維持できる。ここで、稼働率100%が必要とされる上述の最重要負荷への電力供給は、可用性ではなく信頼性に関わる制御問題として筆者らは文献[14]で論じている(3.1を参照)。以上より、本論文で取り扱う電力供給の可用性は稼働率が100%ではない負荷を取り扱うものとする。

スト最小化を目的としており、可用性(稼働率)に着目した運用方策という点では異なる。上記の未来予測の利用とは、グリッド内負荷の需要電力、PVの(最大)発電可能電力、EVの移動、及び蓄電池の残存容量等の予測情報をMPCで解く最適化問題の中に考慮することを意味する。本論文の場合、蓄電池の残存容量を状態とし、現在時刻から残存容量の未来予測を行った上で分散電源の出力電力指令値を決定する。この残存容量の予測を活用し、残存容量の上限/下限等の制約に違反しないような分散電源の出力電力指令値を求める。このMPCに関わる最適化問題が求解できる場合には、稼働率を保証する出力電力指令値を決定できる。MPCを基にした運用方策の有用性検証のために、オフィスビル及びEVの実測データを用いた運用方策の数値シミュレーションを行う。更に、運用方策の動作検証を実機シミュレータを用いて実験的にも行う。

本論文の構成は以下のとおりである。2.では、本論文で扱うビル内マイクログリッドの構成を説明する。3.では、可用性を含む設計要件と制御対象である分散電源の物理制約について述べる。4.では、MPCを基にした運用方策について設計の流れを説明する。5.では有用性検証のための運用方策の数値シミュレーション結果を述べ、6.では実機シミュレータを用いた運用方策の動作検証について述べる。7.では、本論文のまとめと今後の課題について述べる。なお、本論文は、既発表[19],[20]の内容を加筆しまとめ直した上で、新規の実験的検討結果を6.として加えたものである。

2. ビル内マイクログリッドの構成

図1に本論文で扱うビル内マイクログリッドの基本構成を示す。このマイクログリッドの構成は実際のオフィスビル[21]を基にしており、分散電源として太陽光発電ユニット(PV) G_1 、据置型蓄電池(Battery) G_2 、及び車載蓄電池(EV) G_3 を有している。また、マイクログリッドは二つの負荷 L 及び CL を有する。

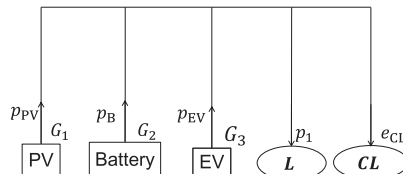


図1 本論文で取り扱うビル内マイクログリッドの構成
Fig. 1 Basic configuration of building microgrid studied in this paper.

特に、負荷 CL は避難施設の電力負荷を含む最重要負荷を示す。ここで、2種類の負荷は正の有効電力の消費のみを行う電力回路の要素である。また、本論文ではこれら負荷の消費は外部から調整不可であるとする。よって、これら負荷が蓄電池を内包した負荷であっても、蓄電池を外部（上位のシステム）から制御できないとする。この仮定は、ノートパソコンなどの実際の蓄電池を含む負荷に基づく。なお、1.にて述べたように、図の構成は商用電源と接続されていない自立型のマイクログリッドを想定したものである。また、6.の実機シミュレータでは設備上の理由より商用電源に接続された場合を想定し、商用電源との連系電力が一定値以下に抑えられている設定で検討を進める（詳細は6.）。図1において、 ppv 、 p_B 、及び p_{EV} はPV、据置型蓄電池、及びEVの出力電力（有効分）を表し、 p_1 は負荷 L への供給可能電力（指令値）、 e_{CL} は負荷 CL の需要電力を表す。

3. 可用性設計の要件定義と分散電源の物理制約

本章では、可用性を含むマイクログリッド運用に関わる設計要件を定義するとともに、設計において考慮する分散電源の物理制約について述べる。

3.1 設計要件

まず、本論文の設計要件を以下に定義する。

- (i) 据置型蓄電池及び車載蓄電池をそれぞれの使用可能な容量の範囲内で運用する。
- (ii) 据置型蓄電池及び車載蓄電池の劣化をできるだけ抑制する。
- (iii) 最重要負荷 CL への継続的な電力供給を保証する。
- (iv) 可用性の評価指標である稼働率を事前に設定した値以上に確保できるようにする。

要件 (i) 及び (ii) は一般的な蓄電池運用の要件である。要件 (iii) は、文献 [14] にて信頼性設計の観点から検討されており、本論文の設計では単純化し扱う（詳細は式 (19) を含む段落を参照）。

要件 (iv) は本論文で新規に扱う要件であり、以下で対象とするマイクログリッドにおける電力供給の可用性の評価指標を「稼働率」として定義する。前述したように最重要負荷 CL に対する要件は既に考慮されているので、本論文では負荷 L に対する可用性について稼働率を導入する。この稼働率は負荷 L への供給可能電力（指令値）が負荷 L の需要電力と一致した期間に

基づいて定式化されるものとする。この定式化にあたり、離散時刻 $k \in \{1, 2, \dots\}$ において負荷 L への供給可能電力（指令値）が実際の電力需要に一致しているか否かを2値変数 $ava(k) \in \{0, 1\}$ で表す^(注2)。 $ava(k) = 1$ は指令値と需要が等しいことを意味し、 $ava(k) = 0$ は指令値と需要が等しくないことを意味する。また、システムの運用期間全体を正の整数 K で表す。これらの変数を用いて、稼働率 $Ava_K \in [0, 1]$ を次式で定義する。

$$Ava_K := \frac{\sum_{k=1}^K ava(k)}{K} \quad (1)$$

ここで、稼働率に関する事前に設定した最小値を $\alpha (> 0)$ とすると、要件 (iv) は以下により定式化される。

$$Ava_K \geq \alpha \quad (2)$$

本論文では、要件 (i) から (iv) までを考慮した分散電源の運用方策、すなわち分散電源の出力電力指令値を決定する問題を検討する。

3.2 物理制約

続いて、前節の設計要件を定式化するために、分散電源の物理制約を数式モデル [14], [19], [20] として導入する。本論文では、グリッド内の電氣的過渡現象は無視し、グリッド内は無損失であるとするとともに、PV、据置型蓄電池、及び車載蓄電池の連系用インバータの動特性は無視する。これらの仮定は、電氣的過渡現象や連系用インバータの特性が一般に ms オーダーで非常に速く、本論文で検討する時間スケール (min) に対して十分小さいことに基づく。

まず、据置型蓄電池及び車載蓄電池の残存容量を表す連続値変数 w_B 及び w_{EV} に関する離散時間動特性モデルを導入する。

$$w_B(k+1) = w_B(k) - \left(\frac{10}{60} \text{h}\right) p_B(k) \quad (3)$$

$$w_{EV}(k+1) = w_{EV}(k) - \left(\frac{10}{60} \text{h}\right) p_{EV}(k) \quad (4)$$

ここで、右辺において $10/60 \text{h}$ を乗じているのは kW から kWh への単位換算を行うためである（以下の数値的検証では、後述する数値的検証で用いる負荷の時系列データと一致するようにサンプリング周期を 10

(注2)：数値シミュレーションでは最適化を用いるため、完全には指令値と需要が一致せず、誤差が生じる。その誤差の大きさは本論文の範囲では 10^{-15} オーダーであった。

分とする)． p_B 及び p_{EV} は据置型蓄電池及び車載蓄電池の出力電力を表す．なお、これらの出力電力の極性について、 $p < 0 \text{ kW}$ は充電、 $p > 0 \text{ kW}$ は放電を示す．要件 (i) を定式化するために、残容量の使用可能容量に関する不等式制約を導入する．

$$0.07W_{B,\text{rate}} \leq w_B(k) \leq W_{B,\text{rate}} \quad (5)$$

$$0.3W_{EV,\text{rate}} \leq w_{EV}(k) \leq W_{EV,\text{rate}} \quad (6)$$

ここで $W_{B,\text{rate}}$ (または $W_{EV,\text{rate}}$) は据置型蓄電池 (または車載蓄電池) の定格容量を表し、定数 $0.07W_{B,\text{rate}}$ 及び $0.3W_{EV,\text{rate}}$ はオフィスビルにおける実機の仕様に基づく使用可能容量の下限値を表す．

更に、分散電源の出力制約を導入するために、 $p_B(k)$ 及び $p_{EV}(k)$ に加えて $p_{PV}(k)$ を導入する．この $p_{PV}(k)$ は PV の出力電力を表し、以下の不等式制約を満たすものとする．

$$\underline{P}_B \leq p_B(k) \leq \bar{P}_B \quad (7)$$

$$\underline{P}_{EV} \leq p_{EV}(k) \leq \bar{P}_{EV} \quad (8)$$

$$0 \text{ kW} \leq p_{PV}(k) \leq e_{PV}(k) \quad (9)$$

ここで、 $\underline{P}_B (\leq 0 \text{ kW})$ (または $\bar{P}_B (\geq 0 \text{ kW})$) は据置型蓄電池の出力の下限値 (または上限値) を表し、 $\underline{P}_{EV} (\leq 0 \text{ kW})$ (または $\bar{P}_{EV} (\geq 0 \text{ kW})$) は車載蓄電池の出力の下限値 (または上限値) を表す．変数 p_{PV} は PV パネルより連系用インバータを介してグリッドへ出力される電力を表し、インバータにより調整可能である．一方 $e_{PV}(k)$ は、時刻 k における PV パネルの発電可能電力を表し、日射量やパネル温度などで決定される．

前述したように、車載蓄電池が使用可能であるか否かは EV がグリッドに接続されているかに依存する．そこで、EV に関する新規の 2 値変数 $g_3 \in \{0, 1\}$ と以下の制約を導入する．

$$p_{EV}(k) = g_3(k)p_{EV}(k) \quad (10)$$

ここで、 $g_3(k) = 1$ (または $g_3(k) = 0$) は時刻 k において EV がグリッドに接続されている (または接続されていない) ことを表す．式 (10) は、時刻 k において EV がグリッドに接続されていない場合 ($g_3(k) = 0$)、車載蓄電池の出力が $p_{EV}(k) = 0 \text{ kW}$ となることを表している．ここで、 $g_3(k) = 1$ の場合、 $p_{EV}(k) = p_{EV}(k)$ となるため式 (10) は意味をもたない式となる．よって、これ以降の p_{EV} については式 (10) の左辺の p_{EV} が対応するものとする．

4. モデル予測制御に基づく分散電源の運用方策

本章では、MPC に基づく分散電源の運用方策について説明する．ここでの運用方策の設計とは、前節の要件 (i)～(iv) を達成するような各時刻ごとの分散電源の出力電力指令値を決定することを意味する．要件 (i) 及び (iii) は、前節の物理制約により MPC の等式・不等式制約条件として定式化される．一方、要件 (ii) 及び (iv) は、MPC の評価関数及び追加の制約条件として定式化される．以上の基で MPC の最適化計算を通して、要件 (i)～(iv) を達成する分散電源の出力指令値が決定される．

まず、要件 (ii) を考慮するために次式の評価関数 J を導入する．

$$J := |p_B(k)| + |p_{EV}(k)| \quad (11)$$

この評価関数を最小化することにより、据置型蓄電池及び車載蓄電池の出力電力の絶対値を小さくするような最適解を得ることが可能になる．そして、出力電力の絶対値が小さくなることにより、過充電及び過放電を防ぎ、要件 (ii) の達成が可能となる．

次に、要件 (iv) を考慮するために、3.1 で述べた負荷 L への供給可能電力を変数 p_1 とし、その要件を MPC の最適化問題に追加する． p_1 の値はグリッド内の需給バランス、蓄電池の残存条件などに依存する．最適化問題に追加するにあたり、 p_1 の上下限の制約条件を次式で導入する．この条件は後述する MPC 内で稼働率の制約条件を記述する際に使用する (式 (20) 及び (21) を参照)．

$$\underline{P}_1 \leq p_1(k) \leq \bar{P}_1 \quad (12)$$

ここで \underline{P}_1 (または \bar{P}_1) は p_1 の下限値 (または上限値) を表す．

以上を基に、負荷 L の可用性に関する制約条件を MPC に追加する．まず、負荷 L へ過不足のない電力供給がされたか否かを表すために 2 値変数 $\delta_{\text{ava}} \in \{0, 1\}$ を導入する．ここで、負荷 L の時刻 k における需要電力を $e_1(k)$ としたとき、 $\delta_{\text{ava}}(k) = 1$ ならば $e_1(k) = p_1(k)$ と規約する^(注3)．これは次式の制約条件として定式化

(注3)：式 (11) の評価関数を採用した本論文の範囲では $\delta_{\text{ava}}(k) = 0$ ならば $e_1(k) \neq p_1(k)$ が最適解において成立している．これにより本論文の稼働率 $p\text{-Ava}_k$ を過小評価する状況が発生し得るものの、今回の稼働率の制約条件は最小値 α に基づくため、このことは運用方策の決定の観点からは問題にならない．

できる.

$$\delta_{ava}(k)e_1(k) = \delta_{ava}(k)p_1(k) \quad (13)$$

ここで k は運用区間 $\{1, 2, \dots, K\}$ 内の現在時刻を表す. 今, 現在時刻 k の出力指令値を決定する場合を考える. MPC の有限予測ホライズンを N とすると, 初期時刻 1 より予測ホライズンを考慮した時刻 $k+N-1$ までの稼働率を要件 (iv) に関する不等式制約条件として導入する.

$$\frac{1}{k+N-1} \left(\sum_{i=1}^{k-1} \delta_{ava}(i) + \sum_{i=k}^{k+N-1} \hat{\delta}_{ava}(i) \right) \geq \alpha \quad (14)$$

ここで $\alpha \in [0, 1]$ は稼働率の事前に設定した最小値を表し, $\hat{\delta}_{ava}$ は現在及び将来の時刻の δ_{ava} を表す. 左辺括弧内の第一項 $\sum_{i=1}^{k-1} \delta_{ava}(i)$ は時刻 $k-1$ までの過去の δ_{ava} の和である一方, 第二項 $\sum_{i=k}^{k+N-1} \hat{\delta}_{ava}(i)$ は現在及び未来の $\hat{\delta}_{ava}$ の和である. 式 (14) により, 過去から予測ホライズン分の未来までのグリッドの状態を考慮し, 事前に設定した稼働率 α 以上を確保することを狙う. 付け加えて, 式 (1) にて使用した ava と δ_{ava} の差異について説明する. 両者とも時刻 k において負荷 L の需要電力と負荷 L へ電力供給指令値が一致しているか否かを示す 2 値変数という点では等しい. 両者の差異は, 3. にて説明したように $ava(k)$ は事後評価される稼働率を評価する際に用いる変数である点にある. つまり, $ava(k)$ が 0 または 1 のどちらの値を取るかは時刻 $i = k$ 以降に判明する. 一方, δ_{ava} 及び $\hat{\delta}_{ava}$ は現在時刻 k から見て $i = 1$ から $i = k+N-1$ までの過去から未来時刻においての需要電力と負荷 L への電力供給指令値の関係を示す.

ここで, 式 (14) を制約条件とした場合, MPC の予測ホライズンを陽に考慮したことにより本来の式 (2) は必ずしも満たされず, 可用性について次式を評価することが必要となる.

$$p-Ava_K := \frac{\sum_{k=1}^K ava(k) + \sum_{i=K+1}^{K+N-1} \hat{\delta}_{ava}(i)}{K+N-1} \geq \alpha \quad (15)$$

ここで, $p-Ava_K$ 及び Ava_K には以下の関係が成立する.

$$p-Ava_K = \frac{K}{K+N-1} Ava_K + \sum_{i=K+1}^{K+N-1} \frac{\hat{\delta}_{ava}(i)}{K+N-1} \quad (16)$$

今, 全ての $i = K+1, \dots, K+N-1$ において $\hat{\delta}_{ava}(i) = 0$ とすると, 式 (15) 及び (16) より以下の関係を得る.

$$Ava_K \geq \frac{K+N-1}{K} \alpha > \alpha \quad (17)$$

上の関係より, 要件 (iv) が保証されている. 同様にして, 全ての $i = K+1, \dots, K+N-1$ において $\hat{\delta}_{ava}(i) = 1$ とすると, 以下の関係を得る.

$$Ava_K \geq \frac{K+N-1}{K} \alpha - \frac{N-1}{K} \quad (18)$$

よって, 適切な N 及び K を選択することにより (例えば, K を N より十分大きくする), 要件 (iv) が $p-Ava_K$ により保証されることになる.

更に, 分散電源の出力指令値及び負荷 L の供給可能電力に対して, 電力の保存則に由来する次式の等式制約条件を課す.

$$p_1(k) + e_{CL}(k) = p_{PV}(k) + p_B(k) + p_{EV}(k) \quad (19)$$

ここで e_{CL} は最重要負荷 CL の需要電力を表す. したがって, p_1 は前段までに述べた稼働率に関する制約条件 (13) 及び (14) に加え, 電力保存則に由来する式 (19) を満たすように決定されることになる. 今, e_{CL} の予測誤差がないと仮定する場合, 式 (19) は最適化問題に負荷 CL の実需要電力が考慮されることになるので, 算出される最適解により負荷 CL に過不足なく電力を供給することが可能となる. つまり, 式 (19) は時刻 k における要件 (iii) のための等式制約条件となっている.

MPC の最適化問題を解くにあたり, 連続変数及び 2 値変数を線形不等式に変換する. 文献 [15], [22] を参考に, $\delta_{ava}(k)p_1(k)$ を補助変数 $z(k) = \delta_{ava}(k)p_1(k)$ で置き換える. この $z(k)$, 式 (12) の \underline{P}_1 及び \bar{P}_1 を用いて, 以下の二つの不等式制約を導入する.

$$\underline{P}_1 \delta_{ava}(k) \leq z(k) \leq \bar{P}_1 \delta_{ava}(k) \quad (20)$$

$$p_1(k) - \bar{P}_1 \{1 - \delta_{ava}(k)\} \leq z(k) \leq p_1(k) - \underline{P}_1 \{1 - \delta_{ava}(k)\} \quad (21)$$

時刻 k において $\delta_{ava}(k) = 0$ とすると, 式 (20) より $z(k) = 0$ となる. 一方, $\delta_{ava}(k) = 1$ とすると, 式 (21) より $z(k) = p_1(k)$ となる. 更に, $z(k)$ を用いて等式制約条件である式 (13) を以下のように変換できる.

$$e_1(k)\delta_{ava}(k) = z(k) \quad (22)$$

以上をまとめると、本論文の MPC で扱う最適化問題は以下のとおり表される。

$$\begin{aligned}
 & \underset{\hat{u}}{\text{minimize}} && J(\hat{u}) \\
 & \text{subject to} && \hat{x}(i+1) = A\hat{x}(i) + B\hat{u}(i) \\
 & && \hat{d}(i+1) = F(\hat{d}(i)) \\
 & && \hat{x}(i) \in X, \hat{u}(i) \in U(i) \\
 & && \forall i \in \{k, \dots, k+N-1\} \\
 & \text{parameter} && \hat{x}(k) = x(k), \hat{d}(k) = d(k)
 \end{aligned} \quad (23)$$

ここで、 $\hat{u}(i) := [\hat{p}_{PV}(i), \hat{p}_B(i), \hat{p}_{EV}(i), \hat{\delta}_{ava}(i)]^T$ 及び $\hat{u} := [\hat{u}(k)^T, \dots, \hat{u}(k+N-1)^T]^T$ は制御入力を示す (τ はベクトルの転置を表す)。 $\hat{d}(i) := [\hat{e}_{CL}(i), \hat{e}_1(i), \hat{g}_3(i), \hat{e}_{PV}(i)]^T$ 及び $\hat{d} := [\hat{d}(k)^T, \dots, \hat{d}(k+N-1)^T]^T$ は外乱変数を示し、負荷の需要電力、EV がビルに接続されているか否かを示す変数、及び PV の発電可能電力に対応する。 F は上述した外乱 \hat{d} の予測のためのメカニズムを示す。式 (19) より、 $\hat{p}_1(i)$ は制御入力並びに外乱変数で置き換えられる。変数 $\hat{x}(i) := [\hat{w}_B(i), \hat{w}_{EV}(i)]^T$ はプラントに相当するマイクログリッド内の蓄電池の状態を示す。式 (23) において、 A 及び B は据置型蓄電池並びに車載蓄電池の動特性を含む制約式より決定される。具体的には、 A は 2×2 の単位行列を示し、 B は以下の行列で与えられる。

$$B = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{10}{60} \text{ h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{10}{60} \text{ h} & 0 \end{bmatrix}$$

X は状態の制約式 (5) 及び (6) より、 $U(i)$ は出力電力指令値の制約式 (7)–(10)、(12)–(14) 及び (19)–(22) より決定される。

本論文の MPC に基づく運用方策では、上式の最適化問題を解くことにより離散時刻ごとの分散電源の出力電力指令値を決定する (図 2)。具体的には、現在時刻 k において MPC Controller が、マイクログリッドの状態 $x(k)$ 及び外乱 $d(k)$ を取得した上で、Optimizer 及び Predictor により現在時刻の出力電力指令値に相当する制御入力 $u(k)$ を決定する。ここで、予測ホライズン及び α の値、及び発生電力と負荷の消費電力の大きさによっては、最適化問題の解が得られない場合が存在する。この場合には運用方策は得られない。最適化問題が求解可能な適切な予測ホライズン及び α を決定する手法の検討は今後の課題である。また、今回取り扱うモデルにおいて、混合整数線形計画問題の解法によっては据置型蓄電池及び車載蓄電池の出力電力

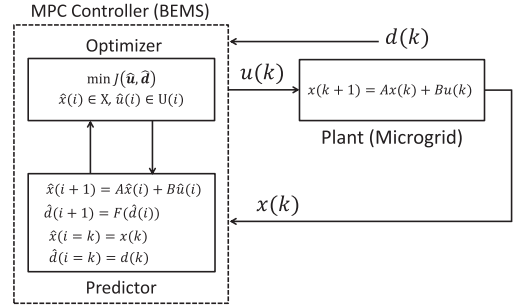


図 2 可用性を確保を目的とした MPC に基づくマイクログリッドの運用方策

Fig. 2 Overview of MPC-based operation for availability design of the building microgrid.

の最適値の組み合わせが一意に決定されない場合がある。この場合、稼働率を一定以上の値にするという主目的より、将来時刻にできる限り発生電力が不足しないような最適解が望ましいと考えられる。よって、最適値の組み合わせが一意に定まらない場合、据置型蓄電池及び車載蓄電池の残存容量がより大きい値になるような最適解を選ぶ必要がある。

5. 数値的検証

本章では、分散電源に対する MPC を基にした運用方策の有用性をオフィスビル及び EV の実測データを用いて数値的に検証する。

5.1 シミュレーション設定

最初に、数値的検証に用いるオフィスビル及び EV の実測データを紹介する。本検証では、負荷の需要電力及び PV の発電可能電力 e_{PV} として既発表 [14], [19], [20] と同様の 10 分間隔の実測データを用いる。このデータは [21] で実測されたものである。 e_{CL} を消費する最重要負荷 CL は避難施設を含むものとする。また、可用性設計の対象である需要電力 e_1 の負荷 L として常に電力を消費する実験設備などを対象とする。図 3 に数値的検証に用いる電力需要並びに PV 発電可能電力の時系列データを示す。また、表 1 に EV の移動及び車載蓄電池のプロファイル [14] を示す。本検証では、表 1 の No.1 のプロファイルを実値、No.2 のプロファイルを予測値として用いる。

続いて数値シミュレーションの設定をまとめる。MPC により運用方策を算出する時間は 8:00 から 18:00 直前までの約 10 時間とする。これにより、オフィスビルのデータのサンプリング時間が 10 分であることから、 K は 60 となる。なお、分散電源出力及び負荷 L

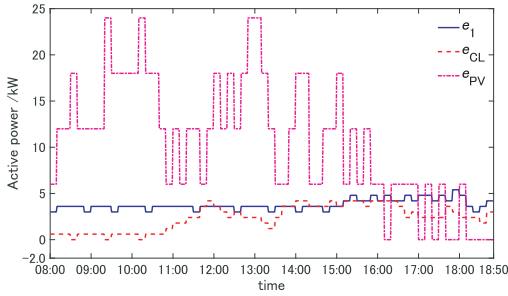


図3 電氣的負荷及び太陽光発電電力の時系列データ

Fig. 3 Time-series data on active power consumed by loads and generated by photovoltaic generation unit.

表1 EVの移動及び残存蓄電池容量のプロファイル [14]
Table 1 Profiles of movement of electric vehicle [14].

Data No.	Departure time	Arrival time	w_{EV} at arrival time
1	10:30	17:10	11.2 kWh
2	9:40	16:40	13.28 kWh

表2 数值的検証に用いる蓄電池のパラメータ設定

Table 2 Parameter setting of in-building and in-vehicle batteries for numerical validation.

\bar{P}_B	-5.0 kW
P_B	5.0 kW
\bar{P}_{EV}	-4.0 kW
P_{EV}	4.0 kW
$W_{B,rate}$	9.6 kWh
$W_{EV,rate}$	16.0 kWh

へ供給電力指令値は10分間同一の値を保持するものとする。また、表2に実際の分散電源の仕様を基に設定した据置型蓄電池及び車載蓄電池の諸量を示す。本節の検証では \bar{P}_1 及び P_1 を30kW及び0kWに設定する。また、 w_B 及び w_{EV} の初期値は表2の $W_{B,rate}$ 及び $W_{EV,rate}$ とする。更に、式(14)における事前に設定する稼働率 α をパラメータとして以下の検討結果を示す。

なお数値シミュレーションでは、数値結果の考察を見通し良く行うために、負荷の需要電力及びPVの発電可能電力は完全に予測可能であるとし、予測のメカニズム F は考慮しなかった。なお、式(23)の最適化問題は混合整数線形計画問題[15]に帰着される。数值的検証では数値計算ソフトウェアMATLAB(Mathworks製、バージョンR2018a)のソルバーintlinprogを使用した。

5.2 シミュレーション結果と考察

本節ではMPCに基づく運用方策の数値シミュレーション結果を紹介する。図4に予測ホライズン $N=6$

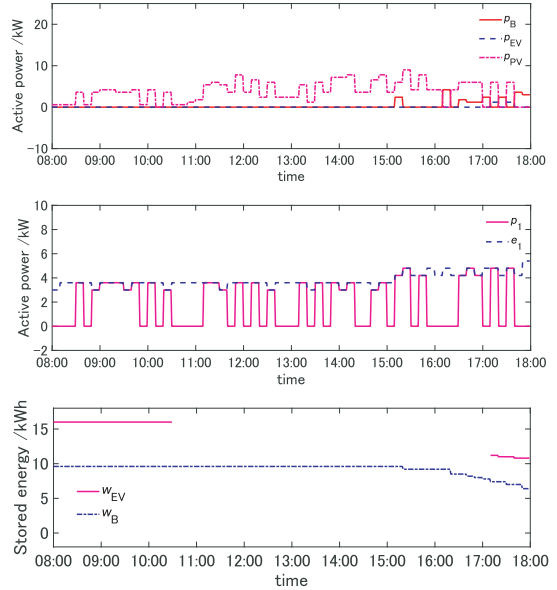


図4 MPCを基にした運用方策を図1のマイクログリッドへ適用した数値検証結果 ($N=6, \alpha=0.5$ の場合)

Fig. 4 Numerical simulation of MPC-based operation for the building microgrid in Fig. 1 using practical data ($N=6, \alpha=0.5$).

とした場合の分散電源の出力及び蓄電池の残存容量の時間変化を示す。図4の一行目は、据置型蓄電池、車載蓄電池、及びPVの出力電力を示す。二行目は負荷 L への供給可能電力 p_1 及び負荷 L の需要電力 e_L を示し、三行目は車載蓄電池及び据置型蓄電池の残存容量を示す。なお、EVがビルから外出し、車載蓄電池の残存容量が不明な時間帯は w_{EV} を表示していない。図4より、MPCに基づく運用方策では、要件(i)及び(ii)が考慮され、15:30まで据置型蓄電池は充放電を行わない。一方、EVがビルへ帰ってきた時刻(17:10)以降は、両方の蓄電池が放電を行っている。本論文で用いたオフィスビルのデータは晴後一時曇の天候において収集されたものであり、日中のPV発電可能電力 e_{PV} が大きいことから、稼働率に関する制約条件式(14)を満たしながら、蓄電池を利用することなくPV出力電力 p_{PV} が負荷 CL 及び L で利用されたことを意味している。

表3に稼働率 α 及び予測ホライズン N を変化させた場合の可用性の評価指標 $p-Ava_K$ の数値結果を示す。ここで、表3のNon-Opt.はMPCの制約を満たす最適解が得られなかったことを示す。一方、最適解が求められた場合において、いずれの予測ホライズン N の場

表3 稼働率の評価指標 $p\text{-}Ava_K$ の数値結果
Table 3 Numerical results of the degree of availability.

α	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$N = 3$	0.323	0.403	0.516	0.613	0.710	0.806	Non-Opt.	Non-Opt.
$N = 6$	0.308	0.400	0.508	0.600	0.708	0.8	0.908	Non-Opt.
$N = 9$	0.309	0.412	0.5	0.603	0.706	0.809	0.912	Non-Opt.
$N = 12$	0.310	0.408	0.507	0.606	0.704	0.803	Non-Opt.	Non-Opt.

場合も $p\text{-}Ava_K$ が設定した α よりも大きい。ここで、 α を大きくした場合、具体的には $\alpha = 0.9$ 及び $N = 9$ の場合も定性的に同じ運用結果が得られることを補記する。また、稼働率を 0.9 及び 1.0 と大きくした場合、式 (14) の求める稼働率が高くなり、負荷 L への供給可能電力を需要電力 $e_1(k)$ に等しくする時刻を増やす必要がある。この場合、「グリッド内発生電力 < グリッド内需要電力」(例えば、夕刻等)となる場合に、本節の検証で用いる負荷及び PV の実データにおいて最適化問題を解くことができず、入力を求めることができなかつたと考えられる。また $\alpha = 0.9$ の場合の各ホライズンでの結果について言及する。 $N = 3$ の場合ではホライズンが極端に短いことから、夕方の PV の発電可能電力の減少に対応できず、供給可能電力が需要電力を下回るケースが多くなる。このため、ホライズン内において稼働率 0.9 を達成することができず、最適解が得られない。一方、 $N = 12$ とした場合、夕方以降、特に 18:00 以降の PV の発電可能電力の減少を考慮した計画を立てることになる。よって、PV の発電可能電力が存在しない時間帯も含めて稼働率を確保できるような計画をたてることにより、「グリッド内発生電力 < 需要電力」となる時間帯を考慮する場合が増え、制約を満たす解が得られなくなる。このため、今回の検証において、 $N = 6, 9$ の場合のみに最適解が得られたと考えられる。 α を低い値から大きくしていき、複数の外乱(例えば雨の日の太陽光発電可能電力等)に対して数値的検討を繰り返せばグリッド内の発電電力容量等が与えられた場合に達成可能な稼働率を評価することも可能であると考えられる。しかし、現状検証に資する実データを入手できていないため、この点は今後の課題である。

ここで、実システムで要求される稼働率について言及する。本節の検証において、稼働率を考慮する負荷 L に相当する実際の負荷には、電力を常時消費する実験設備に加えて、部屋利用での需要として一般電灯及びコンセントが存在する。これら負荷について、時系列データ全時間帯内の 0.6kW 以上の電力を消費した

利用率は、電灯が 20% であり、コンセントが 13% であった。この負荷の利用率から、例えば、0.6kW の電力供給に関する可用性を評価すると、20% の稼働率が必要とされることになる。30% 以上の稼働率を達成しており、実負荷が必要とする可用性は今回の設計より確保されている。

このように、MPC に基づく定式化により、分散電源の物理制約を満たしながら要件 (i)~(iv)、特に (iv) の稼働率の要件を満たす運用方策の設計が可能であることが数値的に示された。

6. 実験的検証

本章では、提案した運用方策の動作検証を実機シミュレータにより実験的に行う。

6.1 検証対象のグリッド構成と実験条件

本節の実験的検証では、実機シミュレータの動作制約より、図 5 の構成を対象とする。前節までの構成との差異はグリッドが商用電源と接続されている点にある。これは、後述する実機シミュレータで使用するパワーコンディショナ (Power Conditioning System; PCS) を稼働させるために必要である。このグリッド構成において前節までと同様の可用性設計を行うためには、グリッド内で使用可能な電力が限られた状況を検討する必要がある。そこで、図 5 のように商用電源からの連系線電力を p_0 とし、この p_0 を 0kW とする制約条件を MPC の最適化問題に追加する。

ここで図 5 のグリッド構成について数点補足する。図 5 の Battery Storage は図 1 の据置型蓄電池 Battery に相当する。続いて、図 5(a) 及び (b) は EV の有無による実機シミュレータの構成の変化を示している。図 5(a) は EV がグリッドに接続されていない場合であり、ビル内で利用可能な電源は、商用電源、PV、及び据置型蓄電池である。一方、図 5(b) は EV が接続されている場合であり、ビル内で利用可能な電源は、商用電源、PV、及び車載蓄電池である。つまり、据置型蓄電池並びに車載蓄電池のいずれかのみが使用可能な設定を採用した。これは既存の実機シミュレータの限

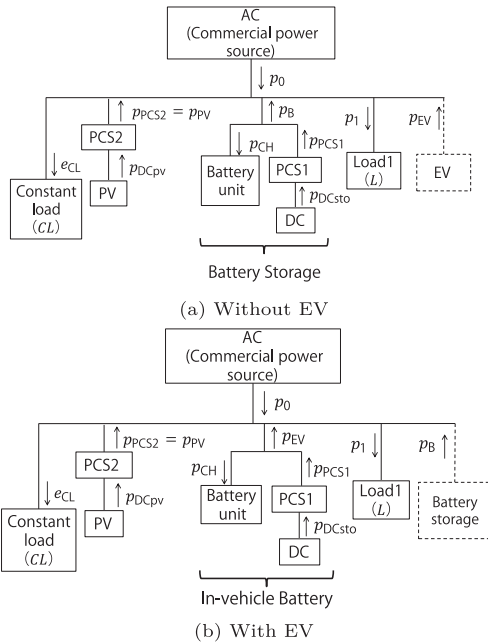


図5 実機シミュレータの構成

Fig. 5 Configuration of hardware simulator for experimental validation.

界として、連続的に充放電可能な蓄電池を一つのみしか模擬できないためである。

続いて、本節の実験条件について説明する。本節ではEVがビルへ到着する前後をシミュレーション期間として設定する。この設定は、付録において述べるMPCのオフライン最適化計算を実機シミュレータに実装するために必要となる。具体的には、シミュレーション期間は1分間隔でEV外出中からビルへ到着後までの6分とし、前節の数値シミュレーションの $k = 53$ から $k = 58$ に対応している。なお、数値シミュレーションと同じく電力供給指令値は1分間同一の値を保持するものとする。また、実機シミュレータの出力上限より、5.1にて示した e_1 及び e_{pv} の実データを1/20倍したものをを用いる。 e_{CL} に関しては100Wで一定とする。なお、事前に設定する稼働率 α は、前述より負荷Lの利用率0.2を上回る0.5と設定する。

6.2 実機シミュレータ

本論文で用いる実機シミュレータは文献[23]で用いられたものをベースとしている。図6に実機シミュレータの外観を示す。以下に、実機シミュレータで構成するために使用するハードウェアについて記述する。

- AC: 交流安定化電源 (菊水電子工業製,

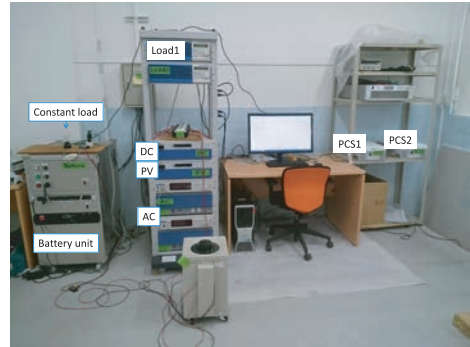


図6 実機シミュレータの外観
Fig. 6 Photograph of hardware simulator.

PCR1000LE) 2台を用いて単相三線式200Vの交流(商用)電源を再現する。

- DC及びPV: 定格2kWの直流電源(菊水電子工業製, PAT250-32T)を用いて再現し, PCS1並びにPCS2へ電力を送る。

- PCS1及びPCS2: PCS(オムロン製, KP30K)を用いる。本研究では、出力目標電流値の調整により出力電力を可変する。PCS1は、定置型蓄電池と併せて据置型蓄電池または車載蓄電池の充放電を模擬するために用いられる。一方、PCS2は直流電源PVとともにPV出力電力を模擬するために用いられる。

- Battery unit: 定置型蓄電池(CAPTEX製, 特注品)を用いる。本機器を商用電源(AC)へ連系している場合、充電または停止動作が任意に選択可能である。なお、充電電力は1.34kWで一定である。

- Transformer: 200Vを100Vへ降圧するボルトスライダ(三菱電機製, S-260)である。

- Load1: 電子負荷(菊水電子工業製, PCZ1000A)を用いて負荷Lを模擬する。制御用コンピュータより送られた信号に従い、負荷Lへの供給可能電力 p_1 を消費する。

- Constant load: CLに関する定電力負荷として白熱電球(公称値100W)1個を用いる。

ここで、実機シミュレータにおける蓄電池の模擬について述べておく[23]。上記の定置型蓄電池は、ACへ連系している場合、充電あるいは停止の二つの動作モードを選択可能である。よって、PCS1との組み合わせにより仮想的蓄電池を構成し、据置型蓄電池及び車載蓄電池を模擬する。定置型蓄電池は $p_{CH} = 1.34\text{kW}$ で一定の充電のみを行い、PCS1は可変の電力 p_{PCS1} を出力する。これらの和である $p_{PCS1} - p_{CH}$ が仮想的

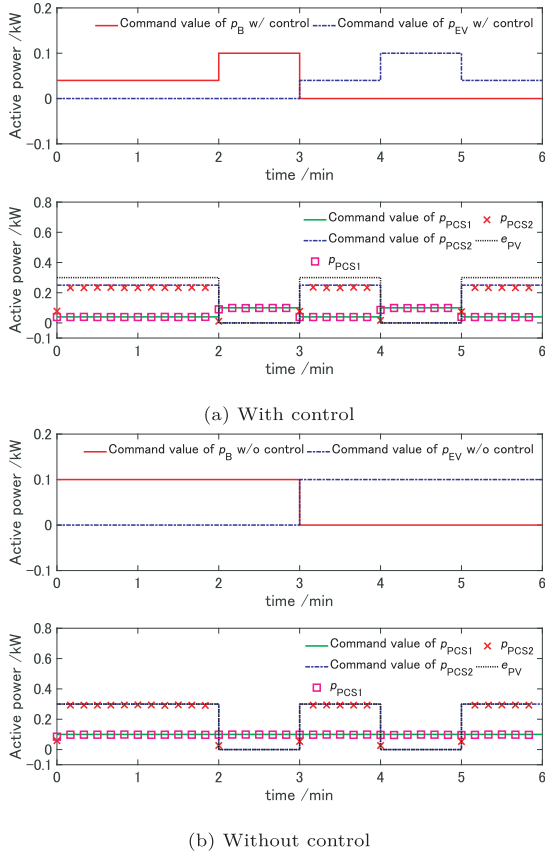


図7 MPC をに基づく運用方策をビル内マイクログリッドに適用した実験的検討結果 1
Fig. 7 Experimental result of MPC-based operation for the building microgrid.

な据置型蓄電池の出力 p_B または p_{EV} となる。よって、据置型蓄電池の出力 p_B (または車載蓄電池の出力 p_{EV}) は \underline{p}_B から \bar{p}_B (または \underline{p}_{EV} から \bar{p}_{EV}) までの連続値を取ることが可能となる。

ここで、定常状態における定格値からのずれについての分析を以下に示す設定でそれぞれ 10 回ずつ行った。その結果、AC の出力をオンにした状態で他の実験機器の出力をオフにした場合の p_0 の値は 0.040 kW であった。また、AC の出力及び白熱電球のスイッチをオンにした状態で他の実験機器をオフにした場合の p_0 の値は 0.146 kW であった。

実機シミュレータへの MPC に基づく運用方策の実装については付録にまとめる。

6.3 シミュレーション結果と考察

本節では実機シミュレータによる実験結果を紹介する。図 7 に据置型蓄電池及び車載蓄電池の出力電力指

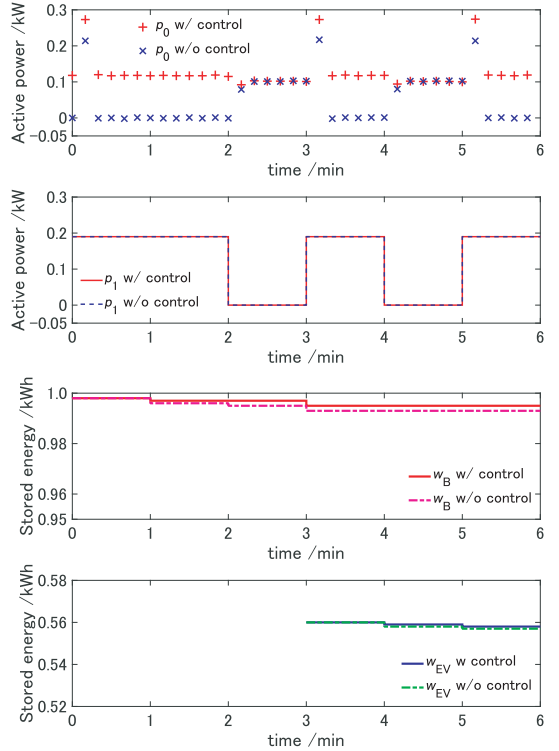


図8 MPC に基づく運用方策をビル内マイクログリッドに適用した実験的検討結果 2
Fig. 8 Experimental result of MPC-based operation for the building microgrid.

令値 (一/三行目)、PCS1 及び PCS2 出力の指令値と実値 (二/四行目) の実験結果をコントローラの有無により示す。ここで、コントローラとは付録にて示す方法において得られる MPC の最適解を出力するプログラムコードである。同様に、図 8 に連系線電力 (一行目)、負荷 L への供給指令電力 (二行目)、2 種類の蓄電池の残容量 (三/四行目) の実験結果を示す。図 7 及び 8 において、横軸は連続時間であり、0 min が $k = 53$ に相当する。また、PCS 及び AC の出力の測定値は点でプロットしており、制御用 PC より指令値を送信後に 6 回測定を行った。ここでコントローラ無しの場合とは次の設定を意味する。

- 2 種類の蓄電池は放電のみを行い、その出力は負荷 CL の消費電力 100 W と一致する。
- PCS2 は PV の発電可能電力を出力する ($p_{PCS2}(k) = e_{PV}(k)$)。
- $p_1(k)$ について、PV 発電可能電力 $e_{PV}(k)$ が 0 kW でない場合、PV が負荷 L の需要電力に相当する電力を出力し、 $p_1(k) = 0.19$ kW となる。この場合 $\delta_{ava}(k) = 1$

となる。

また今回の実験において、据置型蓄電池の w_B の初期値は前節の数値シミュレーションより 0.998 kWh と設定し、EV は時刻 $k = 56$ (3min) に到着したと設定した。この場合の車載蓄電池の w_{EV} の到着時刻における値は表 1 の No.1 のプロファイル及び実機出力上限より 0.56 kWh とした。なお、図 7 に PCS2 の出力電力 p_{PCS2} が表示されていない部分が存在する。これは PCS 出力が 0 kW の場合に機器の仕様より正確な電力値が PC へ送信できない場合があったためである。

ここで得られた実験結果を考察する。図 7 に着目すると、MPC を基にしたコントローラ有り (a) と無し (b) を比較した場合、コントローラ有りにおいて据置型蓄電池及び車載蓄電池の出力電力指令値が小さくなっている。これは、コントローラ有りにおいて考慮される評価関数式 (11) により、上記の出力電力指令値が抑制されているためである。また、(a) の二行目及び (b) の二行目より、特に PCS2 において PCS の出力電力が指令値に対して遅れて追従している。これは文献 [23] で検討されている PCS の制御システムに起因すると考えられる。続いて図 8 に着目すると、コントローラ有りにおいて、拘束条件に $p_0(k) = 0$ kW が考慮されているにもかかわらず $p_0(k)$ が 0 kW と一致していない。また、コントローラ無しにおいても、PV の発電可能電力が 0 kW の場合に負荷 CL の消費電力と据置型蓄電池または EV の出力が等しくなり、 $p_0(k) = 0$ kW となるはずが、 $p_0(k)$ は 0.1 kW 程度となっている。PV の発電可能電力が 0 kW でない時刻においても、上述したようなずれの影響により、数式モデルで計算した場合に発生する逆潮流が発生しない。これらの理由について考察する。AC 以外の機器の出力をオフにした場合の p_0 は 0.040 kW であり、少なくとも機器にはこの値以上のずれが生じている。これに加えて、6.2 に述べた電球による消費電力の公称値と実値とのずれ及びボルトスライダの損失等の数式モデルに含まれない影響によって、グリッド内では数式モデルで計算された以上の電力が消費されていたと考えられる。このため、グリッド内での消費電力が大きくなり、 p_0 は逆潮流することが無かったと考えられる。ここで、コントローラ有り (a) と無し (b) を比較した場合、 $p_0(k)$ の変動はコントローラ有りの方が小さくなった。これは、コントローラ有りにおいて考慮される制約条件 $p_0(k) = 0$ kW の効果と考えられる。一方、負荷 L への供給可能電力 $p_1(k)$ はコントローラの有無にかかわら

ず同じ結果となった。よって、 $p_1(k)$ と需要電力 $e_1(k)$ との関係で定まる稼働率がコントローラ有無にかかわらず変化しないことになった。この理由は以下のとおりである。まず、前述のコントローラ無しにおいて、稼働率は負荷 L への供給時刻を数えることで 4/6 となり事前に設定した $\alpha = 0.5$ 以上を達成している。つまり、事前に設定した稼働率以上の稼働率を達成するという要件を満たした分散電源の運用が実現できている。そして今回のコントローラにおいて、グリッド内に発電電力に余裕がある場合に負荷 L へ供給するという方策が立てられているため、コントローラの有無にかかわらず同じ結果となったと考えられる。次に、図 8 の三行目及び四行目に着目する。車載蓄電池の w_{EV} がプロットされていない時刻は EV が外出しビルから離れている場合である。前述した評価関数の効果により、コントローラ有りの方が 2 種類の蓄電池の残存容量は大きくなっている。また、今回の実験において蓄電池は充電動作を行っていない。これは残存容量が下限に対して余裕があるためと考えられる。

以上より、稼働率をコントローラ無しの場合より悪化させることなく、要件 (i)~(iv) を達成するような分散電源の運用方策が実験的に実現されている。

7. む す び

本論文では、ビル内マイクログリッドを対象とし、電力供給の可用性について事前に設定した稼働率 α を設計段階で確保することを目的とした分散電源の運用方策を MPC に基づき新規に提案した。具体的には、分散電源の物理制約、稼働率に関する要件などを等式・不等式制約条件として含む MPC の最適化問題を定式化した。そして、オフィスビル及び EV の実測データを用いて、提案した運用方策を数値的に検証した。これより、MPC に基づく運用方策が、分散電源の運用要件及び物理制約を満たした上で、負荷に対して事前に設定した稼働率 α 以上の可用性を確保できることを示した。また、実機検証により、MPC に基づく定式化が反映された運用方策が実際に動作することを確認した。

最後に今後の課題を述べる。実験的検討において MPC の予測ホライズンを未来予測を利用可能な最低限の 2 とした。これは、MPC の最適解を出力するプログラムコードを実機へ実装する際に対応可能なスク립トの制約の関係によるものであり、予測ホライズンが大きい場合にも対応可能な実装方法の検討が必要

である。また、実験的検討において、稼働率 α を変えた場合の検討も必要である。 α を大きくした場合において、MPCの最適解を出力するプログラムコードのコントローラを生成する段階で最適解が得られないことがあり、本論文の検証の対象とはしなかった。これは前述したホライズンの短さに起因するものである。 α を小さくした場合の検討については、本論文で構築した実機シミュレータの構成上、コントローラの有る無しにかかわらず $\alpha = 0.5$ 以上を達成していたため検証を行わなかった。電氣的負荷及び太陽光発電電力の時系列データを他のものを使用し、稼働率を変化させた場合の検証を行うことも今後の課題である。また、実機の制約上、EV到着後のグリッドにおいて据置型蓄電池は充放電を行わないとした。数値的検証と同じく据置型蓄電池と車載蓄電池の両方からの出力が可能なコントローラ及び実機シミュレータの更新が、提案した運用方策の実運用を視野に入れた実験的検証に向けて必要である。付け加えて、グリッド内負荷が蓄電池を内包する場合において、負荷内の蓄電池を上位のシステムから制御可能とした検討も考えられる。負荷内の蓄電池を上位のシステムから制御可能とし、需要パターンを任意に変化させることに依ってシステムレベルで稼働率制約を達成できるようになる可能性がある。更に、EVの交通手段としての可用性を考慮することも今後の課題の一つである。具体的には、複数台のEVを想定し、それぞれのEVの交通手段としての機能（移動したいときに移動手段として使用する）を維持しつつ、グリッド内需要電力がグリッド内発生電力を超えないようにする制御が考えられる。この場合、EVの交通手段並びに電力供給源としての二つの可用性を考慮することが必要となり、現在検討中である。

謝辞 本研究の遂行にあたり実測データをご提供頂いた緒方司郎博士（オムロン株式会社）並びに清水隆様（関西電力株式会社）に謝意を表します。また、第二著者とEMSのディペンダビリティについてご議論頂きました藤崎泰正先生、土屋達弘先生、並びに和田孝之先生（大阪大学）に感謝の意を表します。更に、実機システムの構築にあたり多大なご協力を頂いた大阪府立大学大橋悠介氏、田口大作氏、並びに尾谷英也氏に感謝します。本研究の一部は科学技術振興機構CREST（#JPMJCR15K3）の支援を受け行ったものです。

文 献

- [1] W. Kempton and J. Tomić, "Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue," *J. Power Sources*, vol.144, no.1, pp.268–279, June 2005.

- [2] W. Kempton and J. Tomić, "Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy," *J. Power Sources*, vol.144, no.1, pp.280–294, June 2005.
- [3] J. Tomić and W. Kempton, "Using fleets of electric-drive vehicles for grid support," *J. Power Sources*, vol.168, no.2, pp.459–468, June 2007.
- [4] 鈴木達也, 稲垣伸吉, 川島明彦, 伊藤 章, "車載蓄電池の利活用が拓く次世代エネルギー管理," 計測と制御, vol.55, no.7, pp.579–584, July 2016.
- [5] 平栗滋人, "特集 信号システムのRAMS分析," RRR: railway research review, vol.65, no.9, pp.12–15, Sept. 2008.
- [6] J.G. Wohl, "System operational readiness and equipment dependability," *IEEE Trans. Reliability*, vol.R-15, no.1, pp.1–6, May 1966.
- [7] 藤崎泰正, 土屋達弘, 和田孝之, Private Communication 2013–2014.
- [8] 薄 良彦, "スマートグリッドに向けたマルチエネルギーシステム技術の可能性," スマートグリッド, vol.4, no.4, pp.9–12, Oct. 2014.
- [9] 三浦昭彦, "新北海道本州間連系設備（新北本連系設備）について," 電学誌, vol.139, no.8, p.556, Aug. 2019.
- [10] 高木喜久雄, 竹田大輔, 飯野 稔, "災害に強い電力供給インフラを実現するスマートグリッド技術," 東芝レビュー, vol.66, no.8, pp.8–12, 2011.
- [11] 余語将成, 西村信考, 荻田能弘, "災害に強い住宅やビルの実現を目指すエネルギー管理ソリューション HEMS 及び BEMS," 東芝レビュー, vol.66, no.8, pp.17–20, 2011.
- [12] 菅 裕之, "清水建設本社ビルにおける事例," 電気設備学会誌, vol.35, no.3, pp.189–192, 2015.
- [13] 地球環境委員会, "電気機器の消費電力の実態と節電対策の提案," 電気設備学会誌, vol.32, no.9, pp.674–679, 2012.
- [14] S. Kimura, Y. Susuki, and A. Ishigame, "A reactive management system for reliable power supply in a building microgrid with vehicle-to-grid interaction," *IEICE Trans. Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol.E101-A, no.8, pp.1172–1184, Aug. 2018.
- [15] 井村順一, 東 俊一, 増淵 泉, ハイブリッドシステムの制御 システム制御工学シリーズ, コロナ社, 東京, 2013.
- [16] M. Morari and J.H. Lee, "Model predictive control: past, present and future," *Computers & Chemical Engineering*, vol.23, no.4, pp.667–682, 1999.
- [17] 足立修一, "モデル予測制御の基礎," 日本ロボット学会誌, vol.32, no.6, pp.499–502, 2014.
- [18] T. Wei, X. Chen, X. Li, and Q. Zhu, "Model-based and data-driven approaches for building automation and control," *Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Design*, pp.26:1–26:8, ICCAD '18, ACM, 2018.
- [19] 木村祥子, 薄 良彦, 石亀篤司, "車載蓄電池を有するビル内マイクログリッドの可用性設計に関する一検討," 信学技報, MSS2017-78, March 2018.
- [20] S. Kimura, Y. Susuki, and A. Ishigame, "An MPC-Based availability design of a building microgrid with in-vehicle battery," *IEEE 7th Global Conf. on Consumer Electronics*, pp.573–577, Nara, Japan, Oct. 2018.
- [21] 平岡雅哉, 小池正俊, 神谷麻里子, "オムロンヘルスケア

- 研究開発および本社新拠点,” ヒートポンプとその応用, no.84, pp.18–23, ヒートポンプ研究会, Sept. 2012.
- [22] A. Bemporad and M. Morari, “Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints,” *Automatica*, vol.35, no.3, pp.407–427, March 1999.
- [23] 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: 実機実験と性能評価,” *信学論 (A)*, vol.J100-A, no.5, pp.183–194, May 2017.
- [24] A. Bemporad, F. Borrelli, and M. Morari, “Model predictive control based on linear programming - the explicit solution,” *IEEE Trans. Automatic Control*, vol.47, no.12, pp.1974–1985, Dec. 2002.
- [25] M. Herceg, M. Kvasnica, C.N. Jones, and M. Morari, “Multi-Parametric Toolbox 3.0,” *Proceedings of the European Control Conference*, pp.502–510, Zürich, Switzerland, July 17–19 2013.
- [26] J. Löfberg, “YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB,” *Proc. CACSD Conference*, pp.284–289, Taipei, Taiwan, 2004.

付 録

本節では、MPC に基づく運用方策の実機シミュレータへの実装について記述する。実機とソフトウェアの制約から、オンラインで式 (23) に示した MPC の最適解を求めることは困難であった。そこで、本論文では実装のためにマルチパラメトリック計画法 [15], [24] に着目する。マルチパラメトリック計画法は、各時刻でリアルタイムに MPC の最適化問題を解くのではなく、あらかじめ全ての状態 x に対して解を導出して保存する MPC のオフライン解法の一つである [15], [24]。今回の問題のように、オンラインで解くことが計算時間や実装の観点から難しい問題に対してはオンラインの MPC では無く、オフラインの解法を用いることで最適解を得ることが可能である [15], [24]。状態 x を特定の値としてではなくパラメータとして取り扱い、現在時刻の最適解を状態 $x(k)$ の関数として状態フィードバック形式で求める。本論文では、マルチパラメトリック計画法問題を解くためのソルバーとして、Multi-Parametric Toolbox (MPT) [25] を使用し、マルチパラメトリック計画法問題の記述に YALMIP [26] を使用した。

ここで、MPT 及び YALMIP を用いてマルチパラメトリック計画法問題を解くにあたり、状態 x , 外乱 d , 式 (14) における k 及び過去の入力の和 $\sum_{i=1}^{k-1} \delta_{\text{ava}}(i)$ はマルチパラメトリック計画法問題への入力パラメータとして取り扱うことが必要となる。このため、式 (10) において g_3 がパラメータとなるため、パラメータに決定変数が乗じられた双線形な式となり、マルチパラメ

トリック計画法問題を解くことができない。そこで本論文では、図 5 に示すように、EV が外出中と EV がビルに到着後の二つで最適化問題を分け、予測ホライズン内において EV の移動予測は持続予測として制御入力を決定する。上述により、 $g_3(k)$ を考慮する必要がなくなり、EV 外出時は $p_{\text{EV}}(k) = 0 \text{ kW}$ となる。

また、式 (22) も双線形な式となっており、マルチパラメトリック計画法問題を解くことができない。更に、使用する電子負荷は定電力モードで 50W が最低値であるため、 $p_1(k)$ が 50W よりも小さい指令値に対応できない。そこで、実機へ実装するために式 (22) を以下のとおり変更する。

$$p_1(k) = (0.19 \text{ kW}) \delta_{\text{ava}}(k) \quad (\text{A}\cdot 1)$$

ここで 0.19 kW は負荷 L の実測需要データの平均値である。式 (A·1) により $p_1(k)$ は 0 kW または 0.19 kW となる。なお、電子負荷の定電力モードの最低値は 50 W であるため、 $p_1(k) = 0 \text{ kW}$ は電子負荷の出力を停止することで対応する。

上述した MPT を用いて得られる MPC の最適解を出力するプログラムコードを以下でコントローラと呼称する。これを制御用コンピュータ上のソフトウェア LabVIEW (NI 製, バージョン 11.0.1) 上で実装するためには入力パラメータとなる決定変数の削減、及び予測ホライズンを小さくすることが必要となる。このために本論文では、 $g_3(k)$, 負荷 CL の需要電力 e_{CL} , 及び負荷 L の需要電力 e_1 を固定値とする。また決定変数の削減に関して、6.2 にて述べたように $p_0(k)$ を 0 kW として計算する。また、予測ホライズン N に関して、MPC の未来予測を利用可能な最低限の $N = 2$ とする。 $N = 3$ 以上の実機検証は現状では難しく、実機シミュレータの更新も含めて今後の課題である。なお、数値的検討と同じく事前に設定した稼働率 α は 0.5 とし、入力パラメータである過去の入力の和 $\sum_{i=1}^{k-1} \delta_{\text{ava}}(i)$ の初期値 ($k = 53$ における値) は 26 とした。この値は数値的検討で MPC により $k = 52$ まで求めた過去の入力の和の値に基づく最後に、EV の移動の実装方法として、LabVIEW のフロントパネル上に EV が到着した場合にオンになるスイッチを導入した。これにより、実機シミュレーションにおいて EV の到着を実機動作中に外部から任意に変更可能となり、EV の利用に関わる不確定性を模擬できるようになる。そして、スイッチが ON になると、状態 x を更新する最初の時刻において EV 到着後のコントローラへ切り替えが発

生ずる。

最後に、実験的検証のための MPC に関する最適化問題をまとめる。まず、ビル内の EV の存在に関連しない拘束条件を以下に示す。

$$w_B(k+1) = w_B(k) - \left(\frac{1}{60}h\right)p_B(k) \quad (\text{A}\cdot\text{2a})$$

$$w_{EV}(k+1) = w_{EV}(k) - \left(\frac{1}{60}h\right)p_{EV}(k) \quad (\text{A}\cdot\text{2b})$$

$$0.04 \text{ kW} \leq p_{PCS1}(k) \leq 1.3 \text{ kW} \quad (\text{A}\cdot\text{2c})$$

$$0 \text{ kW} \leq p_{PCS2}(k) \leq e_{PV}(k) \quad (\text{A}\cdot\text{2d})$$

$$p_{PV}(k) = p_{PCS2}(k) \quad (\text{A}\cdot\text{2e})$$

$$\left(\sum_{i=1}^{k-1} \delta_{ava}(i) + \sum_{i=k}^{k+N-1} \hat{\delta}_{ava}(i)\right) \geq \alpha(k+N-1) \quad (\text{A}\cdot\text{2f})$$

ここで、式 (A-2a) 及び (A-2b) で $1/60h$ を乗じているのは kWh から kW への単位換算を行うためである (実機でのサンプリング周期は 1 分としている)。式 (A-2c) は、PCS1 と定置型蓄電池とを併用して仮想蓄電池を実現するために必要な拘束条件である。式 (A-2d) は、式 (A-2e) より分かるように、PCS2 の出力制約を表している。一方、据置型蓄電池、車載蓄電池、及び負荷 L への供給可能電力 p_1 に関する上下制限約は 4. までの制約と変わらない。なお、 $\underline{P}_B, \bar{P}_B, \underline{P}_{EV}$ 、及び \bar{P}_{EV} の値は図 5 の構成ごとに異なる。また、負荷 L への供給電力指令値 $p_1(k)$ は式 (A-1) で定義されており、その上下限の制約は式 (12) で定義されている。なお、実機容量を考慮して、 $\underline{P}_1 = 0 \text{ kW}$ 及び $\bar{P}_1 = 1.5 \text{ kW}$ とする。式 (A-2f) は式 (14) を MPT 及び YALMIP でマルチパラメトリック計画問題として解くために変形した式である。ここで、 $k, \sum_{i=1}^{k-1} \delta_{ava}(i)$ 、及び N はコントローラへの入力パラメータとなる。

次に、EV が外出中の場合の据置型蓄電池及び車載蓄電池に関連する拘束条件を以下に示す。

$$\begin{aligned} p_B(k) &= p_{PCS1}(k) - p_{CH}(k) \\ &= p_{PCS1}(k) - (1.34 \text{ kW})c(k) \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot\text{3a})$$

$$p_{EV}(k) = 0 \text{ kW} \quad (\text{A}\cdot\text{3b})$$

$$p_{PCS2}(k) + p_B(k) = e_{CL} + p_1(k) \quad (\text{A}\cdot\text{3c})$$

EV が外出中の場合、据置型蓄電池が充放電を行う。式 (A-3a) は据置型蓄電池の出力を示す。 $c(k)$ は時刻 k において据置型蓄電池が充電を行うかを表す 2 値の決定変数である。式 (A-3b) は、EV が外出中は車載蓄電池からグリッドへの出力は行わないことを表す。式

表 A-1 実験的検討における諸量
Table A-1 Parameter setting for experimental validation.

Lower limit of virtual battery \underline{P}_B EV is out/ EV returns	-1.3 kW/0 kW
Upper limit of in-building battery \bar{P}_B EV is out/ EV returns	1.3 kW /0 kW
Lower limit of in-vehicle battery \underline{P}_{EV} EV is out/ EV returns	0 kW / -1.04 kW
Upper limit of in-vehicle battery \bar{P}_{EV} EV is out/ EV returns	0 kW / 1.04 kW
Rated capacity of in-building battery $W_{B,rate}$	1.0 kWh
Rated capacity of in-vehicle battery $W_{EV,rate}$	0.8 kWh
Power to load L p_1	0.19 kW/0 kW
Demand of load CL p_{CL}	0.1 kW

(A-3c) は図 5 に示したグリッド内の電力に関する物理制約を表す。 p_0 は 0 kW と設定するため式 (A-3c) には考慮されていない。また、負荷 CL は電球の消費電力であることから 100 W で一定とみなせる。

最後に、EV がビルへ到着後の据置型蓄電池及び車載蓄電池に関連する拘束条件を以下に示す。

$$p_B(k) = 0 \text{ kW} \quad (\text{A}\cdot\text{4a})$$

$$\begin{aligned} p_{EV}(k) &= p_{PCS1}(k) - p_{CH}(k) \\ &= p_{PCS1}(k) - (1.34 \text{ kW})c(k) \end{aligned} \quad (\text{A}\cdot\text{4b})$$

$$p_{PCS2}(k) + p_{EV}(k) = e_{CL} + p_1(k) \quad (\text{A}\cdot\text{4c})$$

EV がビルへ到着後は車載蓄電池が充放電を行う。LabVIEW 上の実装方法で述べたように、実機シミュレータの制約上、 $p_B(k)$ は 0 kW で一定とする。式 (A-4c) は図 5 に示したグリッド内に関する物理制約を表す。なお、実機の場合の評価関数 J として同じ式 (11) を用いる。表 A-1 に実機容量を考慮した据置型蓄電池及び車載蓄電池のパラメータ諸量、負荷の需要電力をまとめて示す。

(2020 年 3 月 21 日受付, 7 月 8 日再受付,
8 月 27 日早期公開)

木村 祥子

2014年大阪府立大学工学部電気情報システム工学科卒。2016年同大学大学院工学研究科電気・情報系専攻博士前期課程修了。2019年同大学院博士後期課程修了。在学中はエネルギーマネジメントシステムに関する研究に従事。博士（工学）。

薄 良彦（正員）

2005年3月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程了。同年4月同大学院工学研究科助手。2011年10月同講師。2016年4月大阪府立大学大学院工学研究科准教授。現在に至る。2008年4月～2010年3月米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校客員研究員（日本学術振興会海外特別研究員）。2019年10月より科学技術振興機構さきがけ研究員。非線形力学系の理論と応用、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）。IEEE、SIAMなどの会員。

石亀 篤司

1989年3月大阪府立大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了。同年4月同大学工学部助手。1997年4月同大学大学院工学研究科講師。2007年10月同大学准教授。2010年4月同教授。現在に至る。1995年8月～1996年7月米国コーネル大学客員研究員。システム最適化、電力システムの解析・制御に関する研究に従事。博士（工学）。電気設備学会、IEEEなどの会員。