

称号及び氏名	博士（工学） 木村 祥子
学位授与の日付	平成 31 年 3 月 31 日
論文名	「ビル内エネルギー供給に関するシステム設計 及び経済性評価の研究」
論文審査委員	主査 石亀 篤司 副査 小西 啓治 副査 森澤 和子

論文要旨

本論文の研究はビルディングエネルギーマネジメントシステム（Building Energy Management System; BEMS）に関わる。具体的には、ビル内エネルギー供給の信頼性及び可用性設計、経済性評価に関する検討を行った一連の研究結果をまとめたものである。

近年、ビルによる消費エネルギー量は大きく、温室効果ガス排出の要因の一つとしてビルのエネルギー消費が挙げられている。EMS 自体の基本的な枠組みは、エネルギーの消費と供給を計測するとともに、コスト最小化等の目的を達成するため、エネルギーシステム内の負荷及びエネルギー源等に対して制御を行うことである。BEMS は占有者の快適さを維持しつつエネルギー消費を削減するという機能を有する。また、広域災害時の事業継続性（Business Continuity Plan; BCP）の観点から災害対策に向けた BEMS も検討されている。BCP とは、災害に対して安全・安心な施設とエネルギーの自立を確保することを意味する。加えて、BEMS による影響は、局所的及び大域的に広がる。BEMS の機能である「占有者の快適さの維持」はビルの占有者に局所的な影響を与え、「エネルギー消費を削減する」はビルの占有者及び世界全体のエネルギー消費削減という大域的な影響を与える。さらに、BCP 等の機能はビル単体のみならず大域的な影響を与える。本論文では、エネルギーシステム全体に対する影響の大きい BEMS を取り上げることにより、エネルギーシステム研究分野全体の発展に大きな貢献が期待される。

また、近年、電気自動車（Electric Vehicle; EV）及び燃料電池車（Fuel Cell Vehicle; FCV）

への注目が高まっている。EV 及び FCV の機能として、本来の用途である移動手段としてだけでなく、V2G (Vehicle-to-Grid) のように分散電源として電力系統への電力供給が挙げられる。V2G とは、EV 及び FCV を電力系統へ接続することで、電力を電力系統へ供給することを意味する。この V2G と呼ばれる機能と EMS を組み合わせた実証実験が国内外で報告されており、EV 及び FCV は移動可能な分散電源として EMS の機能実現に貢献することができる。ここで、EV 及び FCV の V2G の機能を利用するには、これらを電力系統へ接続する必要がある。車本来の移動手段としての利便性を損なうことなく、EMS へ参加可能な技術開発が必要である。

さらに、近年、複数種類のエネルギーを一元管理した統合型エネルギーシステムについての研究が進められている。統合型エネルギーシステムによりエネルギーの製造、運搬、供給能力の向上、費用の削減及び環境への影響を最小限に抑えることが可能になる。統合型エネルギーシステムの研究の中でエネルギーシステム管理の複雑さが指摘され、この管理の複雑さに対応するために、モデル化、最適化、予測、及び制御の方法論及びツールを開発する必要があるとされている。よって、統合型エネルギーシステムの EMS を設計する際には、この複雑さに対応した上で EMS の機能を創成するための方法論が必要となる。

これらの背景を受け本論文では、検討対象としてビル内エネルギーシステムを取り扱う。BEMS の管理対象であるビル内エネルギーシステムを取り上げることにより、ビル単体の BEMS 機能の向上のみならず、ビルを取り巻くエネルギーシステム全体の機能向上に貢献する。また、エネルギーシステム内には分散電源として EV 及び FCV を導入する。EV 及び FCV の移動手段としての利便性を考慮すると、ビル内エネルギー源の構成の変化を考慮した上でエネルギーシステムの運用を考える必要がある。さらに、ビル内統合型エネルギーシステムを想定し、電気、水素、及びガスをエネルギーキャリアとして導入する。統合型エネルギーシステムの管理は複雑化するため EMS の機能達成は困難になることが考えられる。したがって、ビル内エネルギーシステムで取り扱う分散エネルギー源及びエネルギーキャリアの構成が複雑化する中で、BEMS の本来の機能の達成及び BCP への対応をする必要がある。本論文は、BEMS 機能及び BCP に関わるエネルギー供給の信頼性、可用性、及び経済性について議論したものである。

まず、ビル内エネルギー供給の信頼性についてシステム工学的アプローチにより設計問題を検討した。工学システムにおいて、信頼性は所望のサービスを「途切れることなく」提供することと定義されている。よって、エネルギー供給の信頼性とは、エネルギー供給を検討対象期間全体に渡って途切れることなく供給することと定義できる。すなわち、ビル内エネルギーシステムのエネルギー供給の信頼性が担保されるとは、ビル内負荷へエネルギーを途切れることなく供給することを意味する。ビル内負荷の中には避難施設等の必ず電力を供給し続けなければならない負荷が存在し、BCP 対応 BEMS の目標としても、電力が限られた状況において事業継続性を担保する必要がある。さらに、BEMS 内の構成を変化させる分散電源及び統合型エネルギーシステムが導入された場合は BEMS の管理が複雑化し、エネルギー供給の信頼性を担保することは困難になる。このような状況下において、エネルギー供給の信頼性を担保することは必須であり、信頼性を担保可能な BEMS 設計を行う必要がある。

続いて、ビル内エネルギー供給の可用性についてもシステム工学的アプローチから設計問題に取り組んだ。従来、工学システムにおける可用性の指標である稼働率はシステム運用の事後に評価される。これを受けて、エネルギー供給の可用性とは、対象とするエネルギーシステムの運用期間全体のうち、エネルギー発生要素から負荷要素へのエネルギー供給が適切に実行された時間の割合と定義される。BEMS の場合、エネルギーとして電力を仮定すると、BEMS 運用期間全体のうち、電源が負荷の需要に等しい電力供給を実行した時間の割合として定量化できる。ビルの事業継続性及び占有者の快適さの維持という点では、災害時の最重要負荷の他に事業継続に必要な負荷へも所望の電力を供給可能である必要がある。また、EV 及び FCV 等の移動可能な分散電源を有するビルの場合または商用電源と接続していない場

合、発電要素から発生する総電力が需要の総電力を満たさない場合があり、可用性の担保が必要となる。さらに、ビル内統合型エネルギーシステムを実現する場合においても、信頼性の担保と同じく可用性の担保が必要となる。

最後に、ビル内エネルギー供給の経済性について、解析問題の立場から議論を行った。信頼性及び可用性設計に関する議論は BEMS 本来の機能の中の「占有者の快適さを維持」の部分に相当する。BEMS 本来の機能の「エネルギー消費を削減する」及び EMS の目的であるコスト最小化は、エネルギーに関わるコストの最小化という経済性に関連する。これを受け、先行研究において、BEMS 本来の機能であるエネルギー消費の削減のために経済性の評価が行われている。また、統合型エネルギーシステムに対する経済性検討も報告されている。経済性検討は、分散エネルギー源の導入または運用コスト減少に寄与し、分散エネルギー源を導入したエネルギーシステムの普及促進につながる。よって、新しいエネルギーシステムの普及への貢献という面から経済性の評価及び経済性を考慮した運用法の提案が必要である。

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章では、本論文の研究背景として BEMS, V2G, 及び統合型エネルギーシステムについて述べた後に、エネルギー供給の信頼性、可用性、及び経済性について議論した。

第 2 章では、エネルギー供給の信頼性を担保するための EMS を設計した。設計対象として、統合型エネルギーシステムを対象とし、設計手法として、リアクティブシステムを実現する形式手法を採用した。生成したリアクティブ BEMS を示すオートマトンより、スイッチの切り替えルールが得られ、最重要負荷へ継続的に電力供給ができることを示した。次に、エネルギーキャリアとして電気に着目し、EV を有するビルに対して信頼性設計を行った。そして、生成したリアクティブ BEMS の性能を実際のオフィスビルのデータ及び EV のプロフィールを用いた数値シミュレーションにより検証し、その有効性を示した。

第 3 章では、エネルギーキャリアとして電気に注目し、使用可能な電力が限られる自立型マイクログリッドを対象に、電力供給の可用性設計を行った。設計手法としては、所望の稼働率を設計段階で確保可能なモデル予測制御 (Model Predictive Control; MPC) に基づく運用方策を設計した。そして、計算機シミュレーションを実際のオフィスビルのデータを用いて実施し、その結果、所望の稼働率以上の可用性が保証できることを示した。さらに実験的検討のために、運用方策を実機シミュレータへ実装した。実装方法として、入力パラメータとなる MPC 制御器の達成のために、状態フィードバック形式で MPC の最適化問題の最適解を求めるマルチパラメトリック計画法を用いた。実験的検討の結果、実装した運用方策により設定した稼働率以上を保証できることを示した。また、運用方策を導入した「制御有り」と運用方策を導入していない「制御無し」を比較し、制御有りの場合は商用電源からの出力の変動が小さくなり、据置型蓄電池及び車載蓄電池の出力を抑えることを実験的に示した。

第 4 章では、電気、ガス、及び水素をエネルギーキャリアとして取り扱い、経済性の評価の対象として、電力と水素を併給可能な燃料電池 (FC) を有するビル内統合型エネルギーシステムを想定した。ビルを水素ステーションとして機能させ、水素需要の不確実性を定式化に導入可能な確率計画法を用いて、電力及びガスのエネルギーコストを最小にする運用法を提案した。そして、オフィスビルの電力、熱需要及び水素需要データを用いて、エネルギーシステム運用の経済性評価のための数値シミュレーションを行った。この結果、電力価格がガス価格に比べて高い場合において、水素併給型 FC を導入した方が FC 未導入の場合と比べコストを削減できることが分かった。また、水素併給型 FC と熱併給型 FC のエネルギーコストを比較すると、熱需要が低い場合において、水素併給型 FC を導入した方がコストを削減できることを示した。

第 5 章では、それぞれの検討で得られた知見についてまとめ、今後の課題について述べた。

審査結果の要旨

本論文は、ビルディングエネルギーマネジメントシステム (Building Energy Management System; BEMS) に関わるビル内エネルギー供給の信頼性及び可用性設計、経済性評価に関する研究をまとめたものであり、以下の成果を得ている。

- (1) エネルギー供給の信頼性を担保可能なリアクティブ BEMS を形式手法により実現した。その結果、生成したリアクティブ BEMS を示すオートマトンから、スイッチの切り替えルールが得られ、例を用いたその切り替えルールにより最重要負荷への継続的な電力供給ができることを示した。さらに、生成したリアクティブ BEMS の性能を実際のオフィスのビルデータ及び EV のプロファイルを用いた数値シミュレーションにより明らかにした。
- (2) エネルギーキャリアとして電気に着目し、使用可能な電力が限られる自立型マイクログリッドを対象に、電力供給の可用性の設計を行った。設計手法としては、所望の稼働率を設計段階で確保可能な MPC に基づく運用方策を用いた。シミュレーションを実際のオフィスのビルデータを用いて行い、その結果、事前に定義した稼働率以上を保証できることを示した。
- (3) 電力、ガス並びに水素をエネルギーキャリアとして取り扱い、水素併給可能な FC を導入した統合型エネルギーシステムを導入したビルを対象に経済性の評価を行った。ビルを水素ステーションとして機能させ、水素需要の不確実性に対し確率計画法を用いて、電力及びガスの購入にかかるエネルギーコストを最小にする運用法を提案した。さらに、オフィスの電力及び熱需要並びに FCV による水素需要データを用いて、運用法の評価のための数値シミュレーションによりその有用性を明らかにした。

以上の諸成果は、ビル内統合型エネルギーシステムでのエネルギー効率がよい製造、運搬、負荷への供給及び貯蔵のための知見を与えるとともに、BEMS 本来の機能である占有者の快適さを維持し災害時の事業も継続できる BCP 対応 BEMS の実現に貢献し、エネルギーシステム並びに分散エネルギーの研究分野における学術的・技術的な発展に寄与するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。