

氏名（本籍） 佐藤冬樹（千葉県）
学位の種類 博士（工学）
学位記番号 甲第1152号
学位授与の日付 2023年3月19日
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当
学位論文題目 業務用ビルの非監視設備を考慮した電力需要
構造の分解方式の提案と推計への応用

論文審査委員 （主査）教授 植田 譲
教授 小泉 裕孝 教授 阪田 治
准教授 山口 順之 教授 長井 達夫
電力中央研究所 グリッドイノベーション技術本部
上席研究員 上野 剛

論文内容の要旨

本論文では、業務用ビルの電力需要構造を明らかにする方法論と分解で得られた情報を用いて非日常時の電力需要を推計する方法について提案した。

第1章では、本論文が行われた背景や目的について述べた。世界的に脱炭素化が進む中、業務用ビルにおいてもエネルギーマネジメントの必要性が高まっている。業務用ビルでは省エネ法等による規制のほかに電力コストの削減や建物の資産価値向上という観点から総消費電力を管理、削減するといったエネルギーマネジメントへのニーズがある。一般にビルでは、設備を高効率な機種に更新するか既存設備の運用を見直すことによってエネルギーマネジメントが行われている。しかし、ビル内にある設備の消費電力が個別に計測されていないため、その活動の効果を見積もることは困難となっている。設備単位の消費電力が計測できない場合、設備の定格電力と稼働状態から簡易的に消費電力を推定することは可能なものの、既設ビルにおいては紙図面の読み取りや現地調査によって大変な労力がかかる。また、ビルの中で大量の電力を消費し、省エネ対策の余地がある空調設備では定格に満たない領域での部分負荷運転が定期的に行われているため、定格電力を用いた消費電力の推定では実測との乖離が生じる。そのため、精緻な効果予測を経ずに専門人材の経験則や試行錯誤によってエネルギーマネジメントが行われているのが実情である。また、最近では事業継続計画やレジリエンスへの関心の高まりから、エネルギーマネジメントの一環として業務用ビルへ太陽光発電設備や蓄電池設備を導入することが検討されている。しかし、それらの設

備設計には非日常時の電力需要を推計しておく必要がある。本研究はそのような背景から、業務用ビルへ低コストに適用可能な電力需要構造分解方式を開発し、専門人材のサポートを受けられていないような中小規模ビルのエネルギーマネジメント活動を改善することが目的である。

第2章では、関連する先行研究の調査を行い、本論文が扱う問題の範囲を決定する。設備単位の消費電力が計測されていないという課題に対してディスアグリゲーションや Non-Intrusive Load Monitoring (NILM) と呼ばれる技術が提案されている。これらの技術は、受電点電力のような複数の設備の合計電力を個別の要素へ分解するものである。NILM は家庭向けに建物内の活動データを用いない方式で、受電点で計測した電流波形を用いるものや、外気温度を用いるものが主流である。一方で業務用ビルの場合は、ビル管理システムが導入されているため、建物内の活動データである設備の運転状態データをディスアグリゲーションに用いることができる。ただし、照明やOA機器などのコンセントに繋がる設備の運転状態はビル管理装置から監視されていないことが多く、これら非監視設備の消費電力がディスアグリゲーションの精度を悪化させてしまう。本論文はこのような課題に対して、設備の運転状態が不明な非監視設備を考慮した業務用ビルの需要構造の分解について扱う。

第3章では、業務用ビルにはビル管理装置の非監視設備があるという課題に対して一番基礎となる方法論を提案した。OA機器といったビル管理システムの非監視設備は単一日周期性を持った運用がなされるという仮定を置き、日周期性を持つ線形基底関数の重ね合わせによって非監視設備の運転状態をモデル化することで、運転状態が観測されている監視設備と運転状態が観測できない非監視設備を同列に扱うことを可能にした。これにより合計電力はすべてのビル設備の線形和となり、時系列の観測データを適用することで線形回帰式として解くことができる。そして、線形回帰式の偏回帰係数がデマンド寄与度、すなわち見かけの設備定格電力となる。この方式を実際のオフィスビル1フロアの平日データを適用しその有用性を示した。

第4章では、非監視設備が持つ複数の日周期性を考慮する拡張について提案した。第3章で述べた方式は非監視設備の消費電力が単一日周期性を持つと仮定していたため、非監視設備電力のパターンが異なる休日などは事前に分離しておく必要があった。現実の業務用ビルでは独自の休日を設けていることが多く、運用は純粋なカレンダー通りでないことが多い。そのため、観測データから運用パターンを判別できることが望ましい。受電点の電力データを用いてオフィスビルの運用状態をクラスタリングする技術はあるが、就業日、非就業日を二分するだけで、在室率の増減や特異日については検討がなされていなかった。そこで、第3章で提案した方式から入力データは増やさずに、複数の非監視設備の日周期パターンを獲得することを試みた。ここで導入した新たな仮説として、非監視設備に単一日周期性があると仮定した場合の回帰残差には、単一日周期性基底関数では表現できなかった成分が含まれるということである。そこで、単一日周期性基底関数を適用して解いた線形回帰式の残差を日ごとに分割し、その日残差パターンを階層型クラスタリング手法によって複数のグループへ分割することでそれがすなわち、平日や休日といった非監視設備の複数の運用

パターンと等しくなるという方式である。実際のオフィスビルのデータを平日、休日問わず適用して精度良く設備単位の電力へ分解できることを示した。この拡張方式を使わずに単一周期性の基底関数を適用した場合、非監視設備電力は複数の運用パターンの平均的なものになり、日毎の分解性能が落ちてしまうこともあわせてわかった。

第5章では、ビル管理システムの非監視設備に空調設備が含まれるケースを想定した拡張を行った。一般的な空調設備の消費電力を参考に、外気温を入力として夏期と冬期に値が大きくなる関数を設計した。なお、外気温情報はビル管理装置で観測していることも多く入手性がよい、それができない場合であっても地域の気象台の観測データを利用することが可能である。設計した関数を基底関数の要素に追加することで、非監視設備に空調設備が含まれる場合に精度よく分解されることが期待される。本拡張方式についても実際の業務用ビルのデータを適用して、精度改善が見られ仮説が正しいことが示された。一方で、空調は夏期と冬期で負荷状態が異なるため、夏期と冬期に同程度の負荷と設計するのは不十分であることもわかった。

第6章では、ここまで提案した業務用ビルの需要構造方式から中間的に得られるデマンド寄与度により可能となる電力需要構造の推計について論じた。推計にあたってはシナリオを作成する必要があるが、非日常時への適用を想定すると在室人数のパラメータがあるほうがよい。そこで、分解方式を拡張し、在室人数のデマンド寄与度を求めることとした。在室人数データについては、非監視設備電力が在室人数に相関がある成分と相関がない成分に分解できることを想定している。オフィスであれば入退室管理装置が導入されていることが多いので在室人数データは容易に利用可能である。実際の業務用ビルのデータを適用して、平常時に獲得したデマンド寄与度を用いて、在室人数が半減する日の電力需要構造を推計できるか実験した。その結果在室人数を考慮したほうが頑健に推計できることがわかった。この結果は企業の事業継続のために非常用発電機やPV、蓄電池といった設備を導入するときどの程度の設備投資が必要か計算するのに役にたつ。提案方式が利用できない場合は、非日常時に利用する重要設備リストを調べ上げ、それら設備の定格消費電力の合計が賄えるような設備を選定することになるが、これはその企業の業務と設備の両方に精通した人間でなければ効果的な計画は立案できない。提案方式であれば、ビル管理装置から得られるデータから実態を考慮した推計結果が得られるため、人手による作業を減らして意思決定に資する情報を提示可能になる。

第7章では、本論文の結論と今後の展望をまとめた。本論文では、一貫して業務用ビルには個別計量メータがほとんどないという点、ビル管理装置ですべての設備を監視していないため、稼働データが取得できない非監視設備が存在するという点を考慮したディアグリゲーション方式の提案と実オフィスビルを利用した精度評価を行った。その結果、非監視設備の消費電力を実用的な精度で推定しつつ、設備単位の消費電力も実績値に追従できることが示された。提案方式はビル管理装置で取得できるデータのみを用いるため、追加の設備設置が不要で経済的であり、適用範囲が広く強力な方式といえる。また、本方式はデマンド寄与度という見かけの設備定格電力を推定できるため、運用シナリオを利用した将来推計に応用できることも利点である。今後は、平常時と非常時の両方のシナリオを考慮した創蓄

設備投資最適化シミュレーションと結合され、企業のBCP活動を支援する技術へ発展していくことが望まれる。

論文審査の結果の要旨

本論文では、学長からの審査付託を受けて、標記6名の審査委員で構成する審査委員会を組織し、提出された学位論文について審査を行った。

審査委員会においては、学位申請者から、学位論文の内容や前回審査における指摘事項の対応結果について説明させ、その後、質疑応答を実施することで、博士論文として満たすべき条件や必要な修正点を確認するという形式で進めた。

第1回審査では、学位申請者から学位論文の概要について説明があり、主には次の点について審査委員から指摘した。学位申請者からの質疑応答の結果を踏まえて学位論文の修正を指示した。

- (1) 誤差項の統計的な性質について
- (2) データの年周期性について
- (3) クラスタリングと回帰分析の関係と手順について
- (4) 外気温や在室人数について
- (5) 表題と章構成について

第2回審査では、第1回審査における指摘事項の対応結果について説明があり、それらを受けた内容についての発表を行った。

第3回審査では、公聴会を兼ねて実施し、これまでの審査での指摘事項を踏まえて修正した内容の発表をした。発表内容は指摘事項に適切に沿うものであり、十分に充実したものであることを確認した。

以下には、学位論文の概要を記す。

本論文では、業務用ビルの省エネルギー・エネルギーマネジメントにおいて重要な情報である電力需要を周期性に応じて分解をする方法を提案している。一般に業務用ビルでは、ビル内にあるすべての設備の消費電力が個別に計測されていないため、精緻な効果予測を経ずに現場の経験則や試行錯誤によってエネルギーマネジメントが行われているのが実情である。そこで本研究では、線形基底関数モデルと残差クラスタリング手法を用いて、非監視設備の消費電力の周期性を正確に推計する手法を提案している。提案手法は、非監視設備消費電力が通年で単一の日周期パターンをもつ場合と、通年で複数の日周期パターンを持つ場合、季節トレンドを考慮した場合、在室人数が計測できる場

合でも適用できるようになっており、実際の業務用ビルの電力消費データを用いて、その有用性が確認された。

本論文は、以下の7章から構成されている。序章は、本研究の背景と目的が述べられている。第2章では、業務用ビルの電力需要を分解することの重要性を説明するとともに、先行研究のサーベイに基づき本研究の位置づけを述べている。第3章では、非監視設備がもつ単日周期性を利用した電力需要構造の分解方式が提案されている。第4章では、複数の日周期性を考慮した電力需要構造の分解方式が提案されている。第5章では、電力需要の季節トレンドを考慮した電力需要構造の分解方式を提案している。第6章は、在室人数を考慮した電力需要構造の分解方式と推計への応用について述べている。第7章は本研究の総括である。

以上により、本論文が博士（工学）の学位論文として、十分に価値のあるものと認められる。