

## 学 位 論 文 要 旨

## 題 目

医療施設内電力グリッドの単独運転時におけるエネルギーマネジメントに関する研究

氏 名 水野裕志

現在、我々は地球規模のエネルギー資源の減少と気候変動に直面しており、CO<sub>2</sub>に代表される温室効果ガスの影響に起因した地球温暖化の対応が喫緊の課題となっている。そのため、わが国では、社会全体で温室効果ガスの排出を削減する低炭素社会の構築を目指している。低炭素社会の実現に向けた具体的手段の一つとして、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの導入が注目されている。自然エネルギーは、気候や気象の条件に強く依存するため、電力の安定化が困難となり、エネルギー管理システム EMS(Energy Management System)によるエネルギー消費量の監視や予測および最適運用が必要となる。

国の長期エネルギー需給見通し策定の基本方針とその政策目標の中で最も重要な視点は、安全性 Safety である。二番目には、エネルギーの安定供給 Energy Security, 三番目に経済効率性 Economic Efficiency を考慮したエネルギー供給の実現と環境への適合 Environment を掲げ、S+3E を政策目標としている。S+3E は、電力事業者との系統連系時を前提に、我が国の自給率の回復を実現させるための政策である。特に、非常電源を備えた医療施設の電力グリッドは負荷の規模から見ると、一つの小規模な電力系統と捉えられ、系統事故に伴う単独運転時においても S+3E の達成は、医療機能を持続させるために重要な視点である。

わが国では、自然災害の発生頻度が高いことから、医療施設の災害対策として、医療業務継続計画の策定や見直しが行われ、特に、電力供給維持のために危機管理体制を強化している。医療施設に備えてある非常用発電機 EG(Emergency Generator)は、一般的な規格として、長くとも 3 日間の電力供給を想定しているが、2016 年熊本地震では、長期間頻繁に発生した余震のために、電力の復帰まで 1 週間費やしたと報告されている。燃料貯蓄量に依存している EG を出来るだけ長く運転させるためには、燃料消費の最少化を目的関数とした最適な電源構成と運用が要求される。その対応として、大容量の太陽光発電 PV(Photovoltaic)とバッテリーを追設し、系統連系時のピークシフト対応や省エネだけでなく、単独運転時の電源確保を検討している施設が増加している。しかし、PV は、天候の影響によって出力変動が大きいため、院内の電力収支に与える影響は無視できず、バッテリーを導入して変動を抑制することが一般的に検討されているが、単独運転時を考慮した最適なバッテリーの容量は、十分に把握されていない。燃料に制限のある EG の燃料消費を抑えるために、PV を活用し、最小容量のバッテリーを把握しながら単独運転に対応できる EMS は、災害時においても医療機能の持続を課せられる医療施設にとって望まれている。しかしながら、病院建築計画において、最適な非常電源容量の決定には、施主の条件や指定病院などの目的に応じて変わり、その選択選定に苦慮しているのが現状であるため最適な設備設計手法の確立が課題である。

これらを背景として、電力システムの異常を想定した単独運転時において、医療施設内の EG に、PV を併用し、安定した電力を 1 週間供給するための EMS について提案する。まず、医療施設内の電力グリッドの特性とモデル化によって、異常時を想定した電力収支を試算し、需要と供給のそれぞれの問題点を抽出する。次に、PV の併用に起因した EG の低容量化と分散化に対応するために、数理計画法を用いた最適運用を提案する。加えて、医療施設の電力の安定性を把握するために、院内電力グリッドの系統周波数に着目する。安定化のために気象データを用いたディープラーニングによる学習を行い、院内の負荷予測モデルを提案する。さらに、PV の出力変動を吸収するバッテリーに関して経済効率性を考慮した最適容量の試算方法を検討する。最後に、エミュレーションシステムを用いて提案する EMS について実験的に評価し、院内グリッドモデルを用いて設備容量に関係なく燃料消費量を予測できる設備設計モデルを提案し、検証する。

これらの提案は、契約電力 980 kW、定格容量 1,000 kVA の既設の EG 1 台を有する医療施設を対象として検討する。契約電力の 20 %相当の太陽光発電を導入した場合、定格出力 750 kW の EG 1 台および定格出力 250 kW の EG 1 台の組み合わせによる運用が最も燃料消費量を抑制できることがわかった。また、院内グリッドのモデル化によって、非常電源と太陽光発電との併用で系統周波数に及ぼす問題点を把握した。ディープラーニングで学習させた負荷予測の手法では、一年間の実負荷との比較において 93 %以上の精度を示した。負荷予測と新たな制御方式を用いた EMS をエミュレーションシステムで評価した結果、安定した電力を 1 週間供給でき安定な挙動が得られた。また、PV 容量が 2 倍になると燃料消費率は約 20%上昇することがわかった。さらに、PV の出力変動が激しく系統周波数への影響が大きくなる梅雨に着目して統計的に評価した結果、導入する PV の 23 %のバッテリー設備が必要であることがわかった。最後に、提案する設備設計モデルでは、院内グリッドを構成する分散電源容量の境界条件のもと、提案した設備設計モデルから設備容量に関係なく燃料消費量を約 2 %以下の誤差で予測可能であることを示した。

本論文は、第 1 章から第 7 章で構成され、以下に各章の概要を示す。

第 1 章では、本研究に至った背景を述べる。

第 2 章では、EG を備えた医療施設の電力グリッドの特性およびモデル化を行い、単独運転時の電力収支を試算し、現状設備の問題点を抽出する。

第 3 章では、PV の併用に起因した EG の低容量化と分散化に対応するために、数理計画法を用いた最適運用の方法について述べる。

第 4 章では、院内グリッドの安定化の指標として系統周波数に着目し、需給精度向上のために気象データを用いたディープラーニングで、負荷予測の手法を明らかにする。

第 5 章では、まず、3 章の最適化と 4 章の負荷予測を用いて、EG に PV およびバッテリーを併設したモデルを構築し、系統周波数の特性を動特性シミュレーションで把握し、安定化のための制御方式を示す。さらに、経済性効率性を考慮したバッテリー容量の最適な試算方法を検討する。

第 6 章では、5 章の結果を、エミュレーションシステムを用いて実験的に評価し、設備容量に関係なく燃料消費量を予測できる設備設計モデルを提案する。

最後の第 7 章では、以上の成果を総括し、提案する EMS の実用化に向けた今後の課題にふれて結論とする。

## 学位論文審査報告書

学位申請者	水野裕志	学籍番号	/	専攻	総合システム工学専攻	申請学位	博士(工学)
論文題目	医療施設内電力グリッドの単独運転時におけるエネルギーマネジメントに関する研究						
論文審査および試験・試問の成績(表記は合格または不合格)				合格			

### 審査(試験・試問)委員会

主査 教授 田中 義人 印	委員 教授 松井 信正 印
委員 学術教授 黒川 不二雄 印	委員 教授 松村 雅史 印

### 〈論文審査の結果の要旨〉

再生可能エネルギーを活用した発電システムの導入が医療施設にも急速に拡大し、一層の停電対策が求められている。一方、2016年熊本地震では、電力の復帰まで1週間ほどかかってしまったと言う現実にも直面した。燃料備蓄量に依存している非常用発電機を出来るだけ長期間運転するためには、燃料消費の低減と最適な電源構成とその運用が求められる。この実現一環として太陽光発電とバッテリーを追設する検討が進められているが、最適な電源設計の指針や太陽光発電、バッテリー、非常用ディーゼル発電機の最適なマネジメント方法は、ほとんど理解されておらず、設置後の実運用にゆだねられている。このため、最悪の場合は、非常事態時の医療機能の継続が困難となる可能性さえある。

この論文では、電力システムの異常を想定した医療施設内の単独運転時において、非常用ディーゼル発電機と太陽光発電を併用しながら、安定電力を1週間供給するためのエネルギーマネジメント方法を提案した。さらに、設備容量に関係なく非常用ディーゼル発電機の燃料消費量を予測する設備設計モデルを提案し、その予測精度を見積もった。

第1章「緒論」では、本研究に至った背景を述べている。

第2章「院内電力グリッドの特性とモデル化」では、非常用発電機を備えた医療施設の電力グリッドの特性およびモデル化を行い、単独運転時の電力収支を試算し現状設備の問題点を抽出した。

第3章「数理計画法を用いた院内電力グリッドの最適運用」では、太陽光発電の併用に起因した非常用発電機の低容量化と分散化に対応するために、数理計画法を用いた最適運用について述べた。

第4章「ディープリナーニングによる院内負荷の予測」では、院内電力グリッドの安定化の指標として系統周波数に着目し、需給精度向上のために気象データを用いたディープリナーニングで、負荷予測の手法を明らかにした。

第5章「動特性シミュレーション」では、3章の最適化と4章の負荷予測を用いて、院内グリッドモデルを構築し、系統周波数の特性を動特性シミュレーションで明らかにするとともに、安定化のための制御方式を示した。さらに、経済性効率を考慮したバッテリー容量の最適な試算方法も検討した。

第6章「エミュレータを用いた評価試験」では、5章の結果を、エミュレーションシステムを用いて実験的に検証した。これをもとに、設備容量に関係なく燃料消費量を予測できる設備設計モデルを提案し、その予測精度を見積もった。

第7章「結論」では、本研究によって得られた知見をまとめ、展望について述べている。その中でも①単独運転時において安定した電力を1週間供給するためのエネルギーマネジメント方法について提案したこと、②エミュレーション検証をもとにして設備容量に依存しない燃料消費量予測可能な設備設計モデルを提案したこと、③太陽光発電を増やすだけでは燃料消費は少なくなならないこと、④燃料消費量を約2%以下の誤差で予測可能であることを示したことは、災害国であるわが国にとどまらず世界的に見ても新しい知見であり、博士(工学)の学位を授与するに値するものと認める。

### 〈試験(試問)の結果の要旨〉

学位請求論文の内容、ならびに関連分野に関する学識の試験を行った結果、本申請者は博士(工学)の学位を受けるに十分な学識を有することを、審査(試験)委員全員が一致して認めた。