

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 中山間地域における自立型住宅に適したマイクロ水力・太陽光・リチウムイオン電池複合電力供給システムの電力需給解析
 (Numerical study for analyzing electric energy balance of an off-grid residential small hydro and PV generator with lithium-ion battery storage system)

氏 名 下村 誠

論 文 内 容 の 要 旨

持続可能なエネルギー供給システムの実現は人類にとって最も重要な課題の 1 つである。この課題は、人間社会において「エネルギー供給量 $F_s(t)$ = エネルギー需要量 $F_d(t)$ 」の恒等式が成立するための条件を求めることと同義である。この条件の成立条件として地下資源を用いる既存のエネルギー供給システムに対して、より環境負荷が小さく原理的に半永久的な利用が可能とされるエネルギー資源として自然エネルギーが有望とされている。自然エネルギーの効率的な利用形態は電力である。電力は輸送速度、輸送効率、制御性に優れるエネルギー形態である。電力は熱エネルギーや動力エネルギー、光エネルギーとの相互変換が可能であり、通信機器や照明、家電、自動車など社会に幅広く普及し活用されている。自然エネルギーを活用した電力供給システムの持続可能性を定量的に議論するためには解析技術の確立が課題である。

電力の持続可能性を定量的かつスケラブルに議論するためには、電力ネットワークをその構成要素の集合体として捉え、各要素を基礎理論に基づいてモデル化する必要がある。既往研究では、電力ネットワークへの拡張を前提とするモデル化、要素間の相互作用の考慮、電力ネットワークのスケールに対する需要曲線やエネルギー変換モデル精度のバランスなど明確な指標は確立されていない。この問題は空間スケールと構成要素の解析精度のトレードオフに起因する。従って、このトレードオフを解消するため、電力ネットワークが完結する電力供給システムの最小構成である自立型住宅に着目する必要がある。

本論文では、立地条件としてポテンシャルエネルギーと需要についてそれぞれ時系列データが得られる日本、とりわけ太陽光と中小水力のポテンシャルエネルギーが広域に分布する中山間地域を選定した。対象スケールおよび立地条件において最も有効と考えられる電力供給システムとして、LFP（リン酸鉄系リチウムイオン）電池を備えた自立型多結晶シリコン型太陽光発電システム及びらせん水車式水力発電システムの各サブシステムから構成される複合電力供給システムに着目した。同システムの高効率化検討と導入可能性評価を目的として、各構成要素の発電原理である光起電力効果、流体－構造－電磁誘導に基づく性能予測モデルを構築し電力需給バランス解析を行った。

らせん水車に関しては3次元粒子法解析としてMPS法を導入した。また、高速解析手法として、新たにタンクモデルを提案した。蓄電池については、LFP電池はイオンの濃度拡散反応に基づく1次元電気化学反応モデルを導入した。LFP電池の評価のため、既存の安価な蓄電池としてVRLA（バルブ制御式ディープサイクル鉛蓄電池）電池の半経験モデルを導入した。蓄電池については容量劣化特性を考慮した。各要素およびサブシステムについて実測データとの比較を行い、モデルの妥当性検証と応答特性を確認した。検証の結果、各モデルは変負荷特性や変入力ポテンシャル特性を良く再現した。各要素にはそれぞれ電流-電圧や流体-構造など内部相互作用により応答特性に非線形性が現れることが示された。

らせん水車式水力発電システムの性能向上方策を明らかにするため、タンクモデルを用いて、設計変数の感度分析を行った。その結果、総合効率48.1%を達成する設計値を得た。さらに、多目的最適化手法としてNSGA-IIとタンクモデルを組み合わせた解析によって、発電出力、水車重量、水車回転数のパレート解集合を求めた。その結果、発電出力59.9 W-水車重量30.7 kg-水車回転数60.3 rpm-総合効率56%を達成する設計変数群を得た。LFP-太陽光発電システムについて、一般家庭の電力需要と美濃市の日射を想定した条件で電力需給バランス解析を行い、蓄電池容量24 kWh、放電深度85%であれば、LFP電池はVRLA電池の1/2の停電率及び3年以上の耐用年数の向上となることを示した。

性能改善を行ったらせん水車式水力発電システムを、複合電力供給システムとしてLFP電池を備えた自立型太陽光発電システムに統合し、電力需給バランス解析を実施した。本論文では供給安定性に優れることかららせん水車式水力発電システムはベース電源として考慮した。複合電力供給システムの電力需給バランス解析の結果、30 Wのベース電源を導入した場合、停電率を劇的に改善できることが明らかとなった。さらにコストの観点では、許容停電率が0.01程度であれば30 Wのベース電源の導入によりLFP電池容量を33 kWhから15 kWhまで減少させることが可能となることを示した。このとき、蓄電池の削減コストは約15000\$（1ドル=120円の場合、約180万円）と見積もられた。また、ベース電源の導入効果は太陽光発電容量の1/20（=100 W）以下でも停電率の減少だけでなく、蓄電池寿命の増加に対しても有効であることを示した。

電力供給に関する条件を勾配15 deg・水路長1.6 m・流量25 L/sの水路及び美濃市の20年平均日射量が得られる立地、需要側の条件を平均消費電力250 W程度の家庭の電力需要パターンで15年間の運用としとき、らせん水車式水力発電システムはNSGA-IIによる多目的最適化結果によれば発電出力60 W-水車重量30 kg-水車回転数60 rpmが見込まれる。これをベース電源とした太陽光パネル容量2.0 kWp、LFP電池容量15 kWhの複合電力供給システムは、蓄電池の交換なしに15年間の運用が可能であった。このときの停電時間は毎年の梅雨時期の夜間から早朝の数日間、計約18時間のリスクがあることが予測された。また、電力余剰については年間の半分以上の日数でおよそ4 kWh/dayの電力利用が見込まれた。

簡単な試算により本論文で提案した電力供給システムは既存の電力網の15年間の電気料金に対しておよそ4倍のコストを必要とすることが明らかとなった。従って、さらなるコスト競争力の向上が課題である。また、本論文で考慮されていない製造運搬、維持管理、環境負荷、熱利用といった要素をも考慮した解析に基づくコスト評価に対する既存インフラとの比較の必要性が示された。