

# 博士論文概要

## 論文題目

太陽光発電設置住宅群の出力抑制回避手法  
に関する研究

Study on output suppression avoidance methods  
for high penetration of residential PVs

申請者

宮本	裕介
Yusuke	MIYAMOTO

電気・情報生命専攻 先進電気エネルギーシステム研究

2015年10月

我が国においては、2012年7月から再生可能エネルギー固定価格買取制度が開始され、太陽光発電（Photovoltaic:PV）システムの導入量が加速度的に増加している。経済産業省の統計によると2012年7月から2015年5月までのPVシステムの導入量は、10kW未満が約325万kW、10kW以上が約1,684万kWと顕著に増加している。特に50kW未満のPVシステムは、一般用電気工作物として取り扱える出力範囲の拡大等、一連の規制緩和により参入への障壁が非常に低くなったため、今後も配電系統へのPVシステムの導入がますます加速していくものと思われる。しかし、同一配電系統へのPVシステムの導入量が増加すると、配電系統における電圧を適正範囲（ $101\pm 6V$ ）に維持するため、晴天日であるにも関わらず住宅用PVシステムの出力を制限し、発電機会損失（以下、出力抑制）が発生するという技術的課題の発生が懸念されている。

そこで、本論文では上述した住宅用PVシステムの導入課題を解決するため、住宅側からの出力抑制回避手法を提案し、その有用性を検証することを目的とする。具体的な出力抑制回避手法として、「無効電力制御方式」、「ヒートポンプ給湯機を用いた有効電力制御方式」、「定置型蓄電池とヒートポンプ給湯機を用いた有効電力制御方式」を提案する。提案手法については、群馬県太田市で実施されたNEDO事業「集中連系型太陽光発電システム実証研究(FY2002-FY2007)」にて実測された553軒の発電・負荷データを用いたシミュレーションモデルを構築し、数値計算によりその妥当性を検証している。以下に各章の概要について述べる。

第1章では、「序論」として、本論文における背景と目的、及び各章構成について説明する。

第2章では、再生可能エネルギー固定価格買取制度の導入に伴い実施された配電系統にPVシステムを大量導入するための規制緩和策やPVシステムの大量導入により発生する技術的課題について説明する。また、本論文における主要テーマである、住宅用PVシステムが多数台系統連系された一般配電系統における、逆潮流による電圧上昇時にコミュニティ全体を一つの集合体と見た場合の電圧制御方式として検討する。無効電力制御方式及び有効電力制御方式について概説する。無効電力制御方式は、各住宅のPV用パワーコンディショナを用いて、有効電力制御方式は各住宅に導入されたヒートポンプ給湯機若しくは定置型蓄電池及びヒートポンプ給湯機の併用にて実施するものとし、これらの提案手法について概説する。なお、これらの提案手法の効果については、第3章から第5章にて詳述する。さらに、有効電力制御方式として用いるヒートポンプ給湯機及び定置型蓄電池の将来の予測導入量について合わせて説明する。

第3章では、同一配電線に住宅用PVシステムが多数台系統連系された4つのコミュニティ（住宅軒数：900軒, 2160軒, 1404軒, 855軒）において、各PVシステムに搭載されている無効電力制御機能を用いた場合のコミュニティ全体のPVの出力抑制回避率を最大化しつつ、無効電力注入量の最小化、住宅間の無効電力注入量の均平化を目的とした各住宅のパワーコンディショナの無効電力制御方式について提案している。パワーコンディショナによる無効電力制御は電圧上昇抑制という観点では効果が認められており、現状の市販品に実装されているが、従来手法ではコミュニティ全体の注入無効電力量の増加や、各住宅の無効電力注入量にばらつきが生じることが懸念される。そこで、住宅用PVシステムが多数台連系された4つの一般配電系統において、PVの出力抑制量の大きい系統末端に連系された住宅のパワーコンディショナの力率設定を低くし、配電用変電所近傍の住宅では無効電力制御を実施しない「無効電力注入量最小化方式」、PVの出力抑制量の大きい系統末端の住宅のパワーコンディショナの無効電力制御動作開始電圧を高く設定し、配電用変電所近傍の住宅の無効電力制御動作開始電圧を低く設定する「無効電力量均平化方式」を提案し、代表的な晴天日において提案手法の評価を行った。また、提案手法及び従来手法について、1か月間（5月）運転を行い、コミュニティ全体のPVの出力抑制回避率の最大化と無効電力量最小化の両立性を目的関数とした際に、提案手法によりPVの出力抑制回避率を維持しつつ無効電力注入量を最大約4%低減可能であること、及び、コミュニティ全体のPVの出力抑制回避率の最大化と住宅間の無効電力量の均平化の両立性を目的関数とした際に、提案手法によりPVの出力抑制回避率を維持しつつ無効電力量の標準偏差を最大約80%低減可能であることを明らかにしている。

第4章では、同一配電線に住宅用PVシステムが多数台系統連系されたコミュニティ（住宅軒数：1404軒）において、各住宅のヒートポンプ給湯機を用いた有効電力制御方式について提案している。ヒートポンプ給湯機の消費電力量が、晴天時に住宅から流出する逆潮流電力量よりも小さくなること、及び、系統連系（設置）地点の差により各住宅の電圧上昇によるPVの出力抑制量に差が生じることから、ヒートポンプ給湯機の運転時間を住宅毎に最適化する必要がある。特に現在の再生可能エネルギー固定価格買取制度においては、住宅からの余剰（逆潮流）電力は、自家消費するよりも売電することによりコストメリットが生じるため、ヒートポンプ給湯機の昼間運転による不必要な逆潮流電力量の低減、自家消費電力量の増加が発生しないよう、これらの条件も踏まえたヒートポンプ給湯機の運転方法を検討する必要がある。また、PVシステムの発電電力量や需要家の負荷電力量及びヒートポンプ給湯機の消費電力量は季節により変化するため、ヒート

ポンプ給湯機の運転時間帯の最適化は季節別に検討する必要がある。そこで、住宅用 PV システムが多数台系統連系された一般配電系統において、季節別（2月，5月，8月，11月）に代表的な晴天日を1日選定し，同日の発電・負荷パターンを用いて，コミュニティ全体のヒートポンプ給湯機の昼間運転による PV の出力抑制回避量と，低下する PV の逆潮流電力量や増加する順潮流電力量の差分を算出し，これを PV の発電電力量で規格化した値を PV の出力抑制回避率と定義し，これを評価パラメータとした各住宅の運転時間帯に関する評価を行った。その結果，PV のピーク時刻の前後対称にヒートポンプ給湯機を運転する実運用を想定した運転方法が，PV の出力抑制回避を目的として個々の住宅のヒートポンプ給湯機の運転時間帯を調整する他の運転方法と比較して，PV の出力抑制回避率が大きく変わらないことを明らかにしている。ただし実運用時は，選定した代表日のように必ずしも晴天日が継続するわけではないため，天候に応じたヒートポンプ給湯機の運転方法が求められる。そこで，天気予報と電圧上昇による PV の出力抑制量の相関を分析し，この分析結果を用いて，天気予報を用いたヒートポンプ給湯機の運転方法を提案し，従来手法と比較して，PV の出力抑制回避率が最大約 2%改善されることを明らかにしている。

第 5 章では，平成 26 年度の再生可能エネルギー固定買取価格制度における売電単価と電力会社がオール電化住宅を対象として販売中の買電単価の採用を前提とし，同一配電線に住宅用 PV システムが多数台系統連系されたコミュニティ（住宅軒数：1404 軒）における，各住宅のヒートポンプ給湯機及び定置型蓄電池を用いた有効電力制御による電気料金収益の最大化方法について提案している。ただし，定置型蓄電池は，将来的にも PV システムやヒートポンプ給湯機ほどの導入率の上昇が見込まれていないため，コミュニティ全体の定置型蓄電池の導入率を複数設定し，導入率別の運転方法について評価を行った。一般的には，定置型蓄電池とヒートポンプ給湯機は，深夜の安価な電力を用いた運用が行われるが，提案手法においては，第 4 章と同様に天気予報にて翌日好天が予想される場合に，ヒートポンプ給湯機は昼間運転，定置型蓄電池は朝の時点で充電状態を低くすることにより，PV の出力抑制回避を可能とする。さらに，系統連系地点の差により各住宅で発生する PV の出力抑制量が異なるため，直近の晴天日に記録した充電状態等を制御パラメータとした住宅毎の定置型蓄電池，ヒートポンプ給湯機の運転方法を提案し，従来手法と比較して，1 軒平均の年間電気料金収益が最大約 2 倍になることを明らかにしている。

第 6 章は「結論」であり，本論文の成果について総括している。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 宮本 裕介 印

(2016年2月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 1. 宮本裕介, 林泰弘, 「長期間運用を想定したヒートポンプ給湯器による太陽光発電システムの電圧上昇抑制効果」, 電気学会論文誌 B, Vol. 135, No. 7, pp. 423-436, 2015年7月.</li> <li>○ 2. 宮本裕介, 林泰弘, 「家庭用蓄電池とヒートポンプ給湯器による多数台太陽光発電システムの電気料金改善効果」, 電気学会論文誌 B, Vol. 136 No. 3, pp. 1-14, 2016年3月. (掲載決定)</li> </ul>
国際会議 (全て査読有り)	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. <u>Y. Miyamoto</u>, Y.Hayashi, “Evaluation of improved generation efficiency through residential PV voltage control of a clustered residential grid-interconnected PV”, Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe 2010, pp. 1-8, 2010.</li> <li>2. <u>Y. Miyamoto</u>, Y.Hayashi, “Evaluation of generation efficiency and voltage deviation in residential clustered PV voltage control”, Proc. 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1-6, 2011.</li> <li>3. <u>Y. Miyamoto</u>, Y.Hayashi, “Verifying the avoidance output suppression loss effect: Residential PV reactive power control of a clustered residential grid-interconnected PV systems”, Proc. The International Conference on Electrical Engineering, pp. 1-6, 2011.</li> <li>4. <u>Y. Miyamoto</u>, Y.Hayashi, “Distribution line structure and generation efficiency improvement: A clustered residential grid-interconnected PV”, Proc. 17th Power Systems Computation Conference, pp. 1-7, 2011.</li> <li>5. <u>Y. Miyamoto</u>, Y.Hayashi, “Optimization of reactive power control of clustered residential grid-interconnected PV systems”, 21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference, pp. 1-2, 2011.</li> <li>6. <u>Y. Miyamoto</u>, Y.Hayashi, “Effectiveness of optimal arrangement of the residences operated by reactive power control for a clustered grid-interconnected PV system”, Proc. The International Conference on Electrical Engineering, pp. 1-6, 2012.</li> <li>7. <u>Y. Miyamoto</u>, Y.Hayashi, “Evaluating improved generation efficiency: One year using residential PV voltage control with a clustered residential grid-interconnected PV”, Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe 2012, pp. 1-8, 2012.</li> <li>8. <u>Y. Miyamoto</u>, Y.Hayashi, “Prevention of output suppression through heat pump water heaters for high-penetration residential PV systems”, Proc. 39th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1-6, 2013.</li> </ul>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
国内会議	<ol style="list-style-type: none"> <li data-bbox="288 369 1453 481">1. <u>宮本 裕介</u>, 林 泰弘, 「家庭用太陽光発電システム多数台連系時の出力抑制回避の最大化を目的とした電圧上昇抑制動作パラメータの整定値の評価」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-10-107, PSE-10-106, pp. 1-9, 2010.</li> <li data-bbox="288 521 1453 589">2. <u>宮本 裕介</u>, 林 泰弘, 「住宅用太陽光発電システム多数台連系時の無効電力制御機能による出力抑制回避効果の検証」, 平成 23 年電気学会全国大会, pp. 1-2, 2011.</li> <li data-bbox="288 629 1453 696">3. <u>宮本 裕介</u>, 林 泰弘, 「太陽光発電システム多数台連系時の出力抑制量推定方法の検討」, 平成 23 年電気学会電力・エネルギー部門大会, pp. 1-2, 2011.</li> <li data-bbox="288 736 1453 848">4. <u>宮本 裕介</u>, 林 泰弘, 「太陽光発電システム多数台連系時の出力抑制量推定に関する分析: 系統インピーダンスの影響」, 新エネルギー・環境/メタボリズム社会・環境システム合同研究会, FTE-11-043, MES-11-029, pp. 1-6, 2011.</li> <li data-bbox="288 889 1453 1001">5. <u>宮本 裕介</u>, 林 泰弘, 「太陽光発電システム多数台連系時の出力抑制量推定に関する分析」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-11-093, PSE-11-110, pp. 1-6, 2011.</li> <li data-bbox="288 1041 1453 1108">6. <u>宮本 裕介</u>, 林 泰弘, 「ヒートポンプ式給湯器を用いた太陽光発電出力抑制回避制御の最適化」, 平成 24 年電気学会電力・エネルギー部門大会, pp. 1-2, 2012.</li> <li data-bbox="288 1149 1453 1216">7. <u>宮本 裕介</u>, 林 泰弘, 「ヒートポンプ式給湯器を用いた住宅用太陽光発電出力抑制回避制御の最適化」, 平成 25 年電気学会全国大会, pp. 1-2, 2013.</li> <li data-bbox="288 1256 1453 1323">8. <u>宮本 裕介</u>, 林 泰弘, 「ヒートポンプ式給湯器全軒運用時の太陽光発電出力抑制回避制御の最適化」, 平成 25 年電気学会電力・エネルギー部門大会, pp. 1-2, 2013.</li> </ol>
その他	<ol style="list-style-type: none"> <li data-bbox="288 1393 1453 1541">1. <u>Y. Miyamoto</u>, Y. Hayashi, “Advanced reactive power control at individual residences to smooth energy loss fluctuation for a clustered grid-interconnected PV system”, Journal of Energy and Power Engineering, pp. 1-pp. 12, 2013/8.</li> </ol>