

## 論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 14685 号
------	---------------

氏 名 HARAG Noha Mamdouh Ali Hassan

### 論文題目

Photovoltaic Power System Control to Increase the Flexibility of Frequency Control in Electric Power System  
(電力系統における周波数制御の柔軟性向上のための太陽光発電システムの制御)

### 論文審査担当者

主査	名古屋大学	未来材料・システム研究所	教授	加藤 丈佳
委員	名古屋大学	工学研究科	教授	早川 直樹
委員	名古屋大学	未来材料・システム研究所	教授	山本 真義
委員	東京理科大学	工学部電気工学科	教授	植田 謙

## 論文審査の結果の要旨

HARAG Noha Mamdouh Ali Hassan 君の論文「Photovoltaic Power System Control to Increase the Flexibility of Frequency Control in Electric Power System（電力系統における周波数制御の柔軟性向上のための太陽光発電システムの制御）」は、太陽光発電（以下、PV）をはじめとする変動性の再生可能エネルギー発電（以下、再エネ発電）が大量導入された将来の電力システムにおいて懸念される周波数調整力の不足に対応するためのPV出力制御に関する研究である。

第1章では、まず、研究背景として、2050年カーボンニュートラルを実現するため、燃料需要を電力需要にシフトさせた上で電力需要の50～60%程度を再エネ発電によって賄うことが期待されていること、そのためには300GW程度のPV導入が必要となること、その中で電力需給バランス維持のためには日常的な出力抑制運転の適用が予想されることなどを説明している。次に、本研究の着眼点として、出力抑制された状態からは、出力の上げ下げ（出力調整）が可能であるため周波数変動に応じて出力調整することでPV自身を周波数制御に活用すること、PV等のインバータ電源の増加に伴って低下する電力系統の慣性力を補うようなPVの活用も期待されること、小規模で非常に多数台のPVを周波数制御等に活用するためにはドループ制御による自律分散制御が有効であること、その場合には周波数制御にPVを直接組み込むのではなく間接的に周波数制御に貢献する制御が実用的かつ有用であることなどを指摘している。さらに、電力システム全体として必要なPV出力抑制量に対し、電力システム内の様々な地点における日射変動特性に応じて出力抑制割合を制御することで、PV群全体の合計出力の変動を緩和でき、そもそもの周波数調整力の必要量を削減できる可能性があることを指摘している。これらの着眼点に関連する先行研究の動向を説明し、二つのアプローチにより、電力系統における周波数制御の柔軟性（調整力）を向上させるためのPV出力の制御方法を提案することを述べ、そのための課題を整理して、本論文の目的と構成を述べている。各章の概要は以下の通りである。

第2章では、平常時の周波数制御および系統故障時の周波数変動の両方に対し、自律分散制御によってPVを活用するための方策として、高速・低速のデュアルP-fドループ制御を提案し、計算機シミュレーションによってその有用性を検証している。低速ドループ制御では、PV出力端電圧の数百サイクルの平均値による周波数計測値に基づく制御により、電力システムの負荷周波数制御で対応する変動成分に対してPV出力を制御する。また、電源脱落などで一時的に大きな周波数変動が発生する場合には、数十サイクルの平均値による周波数計測値に基づく高速ドループ制御により、ガバナフリー制御に準じて速やかにPV出力を変化させる。これら二つの制御をシームレスに行うため、低速ドループ特性と高速ドループ特性が異なる2種類のデュアルドループ制御（手法1および手法2）を提案している。手法1では低速・高速の切り替えの閾値を周波数偏差の増加時と減少時で変化させることでシームレスな接続を行うものである。また、小規模なPVへの提供の観点から、より簡単な方法でシームレスな接続を行うため、手法2では低速・高速のドループが共に常時利用されつつ手法1と同様の特性が得られるようなドループ特性を提案している。そして、電力需給バランスに関する簡易シミュレーションモデルを用いて、提案手法1および2の有用性を検証した結果、平常時の残余負荷（＝電力需要－PV出力）に対し、提案手法を適用することで周波数変動が緩和されることを示している。また、高速ドループ制御のみでは一時的に大きな残余負荷の変動があった後にむしろ周波数変動が増加することを示し、低速・高速のデュアルドループ制御とすることの有用性を示している。また、提案手法1と比較して、提案手法2はドループ特性の違いによって高速の応答性がやや劣ることが懸念されるものの、電源脱落に伴う周波数低下に対する効果については提案手法1と概ね同等の効果があることを示している。第2章の末尾では、本論文における限られた条件についての提案手法の有用性検証に対し、異なる条件における提案手法の有用性について考察を加えている。

第3章では、まず、本論文の着眼点として、日射変動が大きなエリアの出力抑制を大きく、日射変動が小さなエリアの出力抑制を小さくすれば、PV群全体の合計出力の変動を小さくできること、これによってPV出力変動に対して必要な需給調整力を削減でき、結果的にPV出力抑制量の緩和が期待されることを指摘している。次いで、提案手法の前提として、数時間先の日射予測に関して、時々刻々の出力変動を予測することは困難であるが、快晴、雲が少ない晴、雲が多い晴、雨天のように、複数の天気分類について、1時間内の出力変動特性が予測できると仮定し、各天気分類について出力抑制レベルと抑制後の出力平均値および変動の大きさとの関係に関するルックアップテーブルに基づき、出力抑制後の1時間平均値が所定の出力抑制後の値に一致することを制約条件としつつ、合計出力変動の最小化を目的関数として、各地点の最適な出力抑制レベルを選択する最適化問題を混合整数計画法によって定式化している。これらに基づき、年間を通じてPV合計出力に対して所定の出力抑制が適用される場合を想定し、63地点で観測された1年間の日射量データを用いて、提案手法の有用性を検証している。その結果、時々刻々の出力変動が誤差なく予測できるとして各エリアの出力抑制レベルを最適化する理想的なケースと比較し、年間の90%程度の時間帯において、理想的なケースにおける出力変動との差が0.01pu以内となり、提案手法の有用性を確認している。

第4章では、本論文で得られた上記の結果をまとめるとともに、提案制御手法の実用化の効果に関する見通し、そのために解決すべき課題が整理されている。さらに、将来的に余剰電力の有効活用策として水素製造が期待されていることを指摘し、本論文で提案した出力抑制割合の最適配分手法の応用の可能性として、電力システム内の異なる地点における日射変動特性の違いに応じた水素製造の最適配分について言及している。本論文の内容は、2050年カーボンニュートラルの実現に向けてPVの導入拡大が期待される中、これによって懸念される周波数調整

## 論文審査の結果の要旨

力の不足を補うための二つのアプローチについて、それぞれ実用性の高い手法を提案するものであり、PV導入拡大を後押しする意味でもタイムリーな研究成果を提供するものとして高く評価される。以上のことから、本論文の提出者であるHARAG Noha Mamdouh Ali Hassan君は、博士（工学）の学位を受けるに十分な資格があると判断した。