

太陽光発電出力変動の抑制と評価に関する研究

学位論文内容の要旨

発電部門における温室効果ガス排出量削減, エネルギーセキュリティ確保を目的として, 再生可能エネルギーを利用した電源に対する関心が高まっている。その中でも太陽光発電 (Photovoltaic generation, PV) は今後 10 年から 20 年にわたって急速な導入拡大が期待されている電源である。一方で, PV 出力は日射量に依存して大きく変動し, 制御が困難であり, 正確な予測が難しいといった特徴を持っているため, 電力系統に大量連系されると安定運用に悪影響を及ぼすことが懸念されている。代表的な悪影響としては周波数変動が挙げられ, 従来は負荷変動が電力需給のアンバランスを引き起こすことで発生する現象であったが, PV が大量連系された状況ではその出力変動が負荷変動に重畳するため, 周波数変動が増大する可能性が指摘されている。これを背景として, 本論文では周波数変動の増大を抑えることを目的とした「蓄電池による PV 出力の変動抑制」, および, 周波数変動の増加量を見積もるための基礎データ整備を目的とした「PV 出力予測誤差の静的・動的なモデル化」, 将来的な状況を想定して周波数制御シミュレーションを行うための「PV 大量導入時の出力変動想定」の各項目について研究を進めた。

第 2 章の「蓄電池による出力変動抑制」では, 新エネルギー・産業技術総合開発機構による実証研究の一環として, 北海道稚内市に建設された稚内メガソーラー発電所を対象として, ナトリウム・硫黄 (NAS) 電池の充放電による PV 出力の変動抑制に関して行った研究について述べている。この研究においては, PV 容量に対して, NAS 電池の MW 容量 (瞬時に充放電可能な電力) が 3 割強であり, PV 出力が 1 分間で定格容量の 8 割程度変化しうることを考慮すると, この NAS 電池 MW 容量では出力変動を吸収しきれないことが起こり得る。そのため, 吸収しきれない変動を最小化可能な手法を開発することが課題であったが, 解決策として, 数十分程度先までに起こり得る PV 出力の最大値と最小値を推定し, その平均値によって発電所出力目標値を設定する変動幅中心法を提案した。また, PV 出力変動の大きさによって, 従来手法である移動平均法と変動幅中心法を切り替えるハイブリッド法を提案した。同手法について, 稚内メガソーラー発電所で測定された PV 出力実績を利用した計算機シミュレーションによって評価を実施した。また, 現地での実機試験も実施し, 提案手法がシミュレーション通り動作することを確認した。さらに, 将来的にメガソーラー発電所に出力変動抑制要件が課される状況を想定し, 仮想的に与えた変動抑制目標を達成するために必要となる蓄電池容量を移動平均法, ハイブリッド法の適用を前提として求めた。

将来の電力需給制御への応用が予想される PV 出力予測には予測誤差が伴い, 電力の需給バランスを保つ上では予測誤差を発電機の出力調整等で補償する必要があるが, 発電機の出力調整能力には限りがある。従って, PV が大量導入された状況において, 適正な発電機の出力調整能力を確保するためには, PV 出力予測誤差の特性を十分に把握することが必要である。そこで, 第 3 章の「出力予測誤差の静的・動的モデル」では PV 出力予測誤差の統計的な分析や時系列解析に基づくモデル化を行った。モデル化に際しては, 電力需給制御の枠組みが変動周期によって異なることを考慮し

て、予測誤差を長周期成分と短周期成分に分割した。このように分割した上で、季節および時間帯によるトレンドを除去するために晴天指数に変換した後で、静的・動的な特性をモデル化した。静的モデルは、予測誤差実績を日時・天候によってグループ分けした後で統計処理を行うことで、日時・天候を入力、起こり得る予測誤差範囲の推定結果を標準偏差で出力するような形とした。また、動的モデルの設計にあたっては、時系列モデルを当てはめ対象となる元時系列が定常性を持っていることが求められるため、長周期成分については晴天指数化による時間帯トレンドの除去、日射量が比較的大きな昼間の時間帯の抽出を行った。短周期成分については、時系列を 30 分毎に分割し、各 30 分間では時系列が定常であるものとみなした。その上で、正規乱数から時系列を生成するためのモデルとして、長周期成分に対しては一次マルコフ過程、周期成分に対しては自己回帰モデルを当てはめた。

次に、第 4 章の「PV 大量導入時の出力推定」では、将来断面を想定した周波数制御シミュレーションを行うために必要な PV 出力変動を準備することを目的として、少数地点での計測データから広域に分布した PV の合計出力変動を推定する手法を開発した。計測データとしては、経済産業省「分散型新エネルギー大量導入促進系統安定対策事業」にて収集された北海道内 19 地点の日射量を利用しており、19 地点のうち、10 地点は狭域に集中しており、その他 9 地点が人口の集中している都市に設置されている。この検討では、地点数が限られている中で、どのようにならし効果（離れた地点での PV 出力変動同士が相殺し合って、合計出力に含まれる変動は相対的に低減される効果）を考慮するかが課題であった。この課題に対する解決策として、メッシュのアプローチを応用することでならし効果を表すローパスフィルタを設計・適用した。ならし効果のローパスフィルタの設計では、対象地域全体を最小 1km メッシュで区切り、一般的に入手可能な国勢調査に関する地域統計メッシュにまとめられている人口に比例して PV が導入される状況を想定したうえで、統計学やスペクトル解析の知見を応用している。このように設計されたならし効果のローパスフィルタに各地点で測定された日射量を通した後で足し合わせることで、ならし効果を詳細に考慮した将来の PV 合計出力変動を推定した。また、このように推定された PV 合計出力に関して、一時間変動幅による評価を行い、ならし効果未考慮時の一時間変動幅と比較することで、ならし効果の考慮による影響を定量化した。

学位論文審査の要旨

主査	教授	北	裕	幸
副査	教授	五十嵐		一
副査	教授	小笠原	悟	司
副査	教授	小野里	雅	彦
副査	准教授	原	亮	一

学位論文題名

太陽光発電出力変動の抑制と評価に関する研究

太陽光発電 (PV) は、エネルギーセキュリティ、地球温暖化対策の観点から将来の電源ベストミックスの一翼を担うことが予想されている。しかしながら、従来型の電源とは異なり、PV の発電電力は、日射量に依存して短期的にも長期的にも大きく変動すると共に、出力を自在に制御することができないという特徴を持っている。従って、PV が電力系統に大量連系されると、電力系統全体の需給バランスを維持することがこれまで以上に難しくなり、電力系統の安定運用に大きな影響を及ぼすことが懸念されている。本論文では、PV が電力系統に大規模に導入されるような将来の電力系統を想定し、その短期的・長期的な出力変動を定量的に評価・推定するための新しいモデリング手法を提案している。また、蓄電池を用いて PV の短周期出力変動を抑制するための技術についても議論されている。いずれも実際の PV 出力データあるいは日射量データを用いて解析を行ったものであり、独創的でありかつ実用的な観点からも優れた研究であると言える。

第2章においては、MW 規模の PV 発電所 (メガソーラー発電所) に対して、その短周期の出力変動を蓄電池の充放電制御によって吸収し、発電所出力の短周期成分を平滑化する技術が提案されている。すなわち、発電所出力の目標値をあらかじめ定め、その目標値と実際の PV 出力との差を蓄電池に充電あるいは蓄電池から放電することで、発電所出力をなるべくその目標値に近づけようとする制御である。ここで、目標値の決定方法として本論文では、過去のある評価時間幅内における PV 出力の移動平均を用いて次時点の目標値を定める方法と、同様に評価時間幅内における PV 出力の最大値と最小値の中心値に目標値を定める方法の2通りの方法を開発している。前者は蓄電池の kWh 容量削減に、後者は同じく kW 容量の削減に寄与する手法であり、変動の大きさに応じて両手法を組み合わせる用いることが有効であることが示されている。また、メガソーラー発電所に対する出力変動抑目標の達成に必要な蓄電池容量についても評価している。なお、本研究は NEDO による大規模電力供給用太陽光発電系統安定化等実証研究の一環として行われたものであり、北海道稚内市に設置されたメガソーラー電所と蓄電池 (NAS 電池) を用いて実施された。蓄電池を併設したメガソーラー発電所は、わが国はもちろん世界的にもあまり例を見ない設備であることから、本研究で開発された制御手法並びに実機を用いた検証は、世界的にも全く新しいものであると評価できる。

第3章においては、上記の稚内メガソーラー発電所における実データをもとに PV 出力の長周期及び短周期変動をモデル化するための手法が提案されている。すなわち、稚内メガソーラー発電所

において日本気象協会から提供された、現時点で最も精度の良い日射量予測ならびに日射量の実績データを用いて、起こり得る PV 出力予測誤差を求め、その短周期および長周期成分のそれぞれに対してモデリングが行われている。一般に電力系統の運用においては、前日などに実施される需要予測に基づいて発電機のスケジューリングが行われているが、予測は当然ながら誤差を含むため、電力需給バランスを保つ上では予測誤差を発電機の出力調整などで補償する必要がある。このため、将来的には、需要予測に加えて PV 出力予測も考慮して発電機のスケジューリングを行うことが必要となり、本研究は必要な短期的および長期的な発電機調整力をあらかじめ推定することを可能とする有用な手法と評価できる。

第 4 章においては、少数地点で分散して測定された日射量に基づいて、将来的に PV が大量導入された場合の PV 合計出力を推定する手法が開発されている。この推定においては、まず対象地域全体を最も近い日射量測定地点によって分割し、分割された各地域での PV 合計出力を求める。その際、分割された各地域も地理的な広がりを持つため、各地域内の PV 出力同士にはならし効果が働き、出力変動が相対的に低減される。提案手法においては、日射量測定地点から 2 地点を選ぶ全ての組み合わせについて、日射量のコヒーレンスを計算し、その結果に基づいて各変動周期が独立とみなせる距離を与え、ならし効果を表現するローパスフィルタを設計している。さらに、このローパスフィルタを用いた PV 大量導入時の合計出力の試算を行い、ならし効果フィルタ考慮時と非考慮時で一時間変動幅による比較を行うことにより、ならし効果フィルタ考慮による PV 出力変動の低減効果が明らかにされている。一般に、住宅用 PV などのように PV が面的に広がって多数導入された場合、全体としては変動がならされるとともに、需要と同様にある統計的な特性を持ち、ある程度予測できる可能性がある。従って、本研究では限られた地点の日射量から地域全体の PV 出力を推定することを可能とするものであり、全体の出力変動については系統電源の必要な調整力を算定することができ、PV 導入量の拡大に寄与できる可能性がある。

これを要するに、著者は、大量に連系された太陽光発電出力のモデリングならびに蓄電池を用いた出力平滑化制御について新知見を得たものであり、電気エネルギー工学、電力系統工学に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。