

博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

Fujihiro Yamada

氏名 山田 富士宏
学位の種類 博士 (工学)
学位記番号 博 乙 第 29 号
学位授与 平成 28 年 1 月 21 日
学位授与条件 学位規定第 3 条第 4 項該当
論文題目 再生可能エネルギーの電力系統導入に伴う解析技術の確立に関する研究
論文審査委員 (主査) 教授 一柳 勝宏¹
(審査委員) 教授 依田 正之¹ 教授 鳥井 昭宏¹ 教授 雪田 和人¹ 教授 平野 正典²

論文内容の要旨

再生可能エネルギーの電力系統導入に伴う解析技術の確立に関する研究

近年、原子力発電所の運転停止に伴い石炭やLNG等による火力発電の発電量割合が増加しており、二酸化炭素排出量の増加や電気料金の値上げなど経済活動への影響が懸念されている。また、原子力発電所運転停止以降の夏季の時期において、需給逼迫時の緊急対応が求められるなど電力系統の運用が年々厳しくなっている。

このため発電分野の方策として、再生可能エネルギーを用いた発電方式に期待が高まっている。しかし、再生可能エネルギーを用いた発電方式は、自然条件に左右され安定した発電量が得られにくいため、計画的に運用することが困難である。さらに、このような発電方式が電力系統に大量に連系した場合は、電力系統の電力品質および需給運用への影響が懸念される。

そこで本論文では、将来的に再生可能エネルギーの導入量の半数を占める太陽光発電、風力発電、水力発電を代表的な発電方式として取り上げ、一般電気事業者の視点で電力系統への導入拡大に伴う課題と対策について精査し、その方策を一提案するものである。

本論文は、全5章から成り、以下に各章の概要を記す。

第1章では、国内のエネルギー政策と再生可能エネルギーを取り巻く環境について述べ、再生可能エネルギーを計画的に導入拡大するには、「供給力の確保」と「送電網の整備」及び「広域連系の運用」が必要であることを論じ、

研究目的と課題を明確にした。本研究では、如何に効率良く計画的に従来の発電方式と再生可能エネルギーを運用するかが焦点であり、設備対策ではなく解析技術による方策の必要性について論じている。

第2章では、東海地区における太陽光発電の導入拡大に伴う電力系統への影響と課題を整理し、対応策について論じている。太陽光発電は、面的に多地点で電力系統に接続するため、全系周波数の維持など安定度が課題となる。このため、太陽光発電の出力変動に伴い揚水発電や火力発電を待機電源として計画的待機運転させる。その必要な待機電源の容量は太陽光発電の出力変動幅によって決まる。つまり、太陽光発電の発電量の上下限を精度良く把握・予測する必要がある。

そこで本研究では、出力変動と相関性の高い要因に着目し、『太陽光発電の発電量予測手法』を導出した。具体的には、全天日射量の変動領域(上限・下限)を灰色理論にて推定し、その後予報気温と過去の全天日射量を入力情報としたニューラルネットワークを用いて全天日射量を予測する。そして、予測した全天日射量から発電電力量を簡易式にて算出するものである。実績値と比較検証・評価した結果、天候および気温データのみの簡易的な手法でありながら、発電量の変動領域(上限・下限)を適切に予測できており、十分に適用可能な手法であることを確認した。

第3章では、東海地区における風力発電の導入拡大に伴う電力系統への影響と課題を整理し、対応策について論じている。風力発電は、風況が良い立地は局地的であり電力系統の末端に接続している箇所が多い。このため、電圧

¹ 愛知工業大学 工学部 電気学科 (豊田市)

² 愛知工業大学 工学部 応用化学科 (豊田市)

維持・高調波など局所的な電力品質が課題となる。これらの課題に対処するには、電圧安定化装置の導入、AFC容量の増大、事故時運転継続などの対策が挙げられる。これらの対策を検討する際には、まず計算機シミュレーションで系統に与える影響を把握する。しかしながら、瞬時値・実効値解析が可能なモデルを個別に構築することは、モデルの整合性・保守・コスト等の面から制約が大きい。また、自励式変換器を有する風力発電の解析は、シミュレーションに要する時間が長くなるため、解析モデルの高速化が必要となる。

そこで本研究では、瞬時値・実効値の両解析を可能とする『風力発電の高速シミュレーションモデル』を瞬時値ベースで開発した。具体的には、実効値解析時には周波数変換部分のスイッチング回路を可変電圧源・可変電流源で簡略化する手法を提案し、シミュレーション時間の高速化を図っている。なお、多岐にわたるパラメータの調整は、様々な型式の風力発電設備で行った諸試験の実測値を用いて設定した。実測値と比較検証した結果、起動・停止から通常運転、系統事故時など様々な運用状態での挙動を精度良く再現できており、実機に忠実な解析モデルであることを確認した。また、従来のモデルと比較して1/100程度の計算時間となり、シミュレーション時間の高速化を実現した。これにより、風力発電の系統連系に伴う電圧対策や系統故障時などの解析を詳細かつ効率的に行えることを確認した。

第4章では、東海地区における太陽光発電・風力発電の導入拡大に伴う電力系統への影響を緩和するための一方策として、水力発電設備による対応について論じている。水力発電は、ダムにより大容量のエネルギーを蓄えることが可能なため、計画的に発電することができる。さらに太陽光や風力発電などによる急激な出力変動分を系統側で吸収するのに最も有効的な方策の一つが、可変速型水力発電機による運転である。しかしながら、利用可能な水力資源の殆どが開発され尽くしており、新規にダムを開発するには多大な時間を要すると共に環境に与える影響が大きいため容易ではない。また原子力発電の停止や再生可能エネルギーの増加に伴い、余剰電力の発生する時期・時間帯がこれまでの運用とは異なってきており、計画的な揚水運転・発電が容易では無くなっている。従って、現在使用できる水力発電設備を有効利用する必要があり、系統運用とダム管理面において、降雨後のダムへの流量の逓減状況を精度良く把握（予測）することが重要となる。

そこで本研究では、クラスタ分析で入力データを分類し、ニューラルネットワークで学習を行う『発電用ダムの流入量予測手法』を導出した。具体的には、基底流量、ピーク

降雨までの累積雨量及び降雨強度、ピーク降雨後の降雨強度及び降雨時間を入力データとし、クラスタ分析で分類を行う。分類した同データ群にてニューラルネットワークで学習を行い、降雨後のダムへの流入量の逓減時定数を推定する。得られた逓減時定数の予測値を用いて逓減曲線（当日、翌日の流量変化）を求めるものである。矢作川上流域を対象に実測値を用い見出した手法の精度検証・評価を行った結果、簡易的な手法ながら降雨後のダムへの流量の逓減状況を精度良く再現できており、十分に適用可能な手法であることを確認した。

第5章では、本研究を総括し今後の展望について記している。

論文審査結果の要旨

近年、原子力発電所の運転停止に伴い石炭やLNG等による火力発電の発電量割合が増加しており、二酸化炭素排出量の増加や電気料金の値上げなど経済活動への影響が懸念されている。また、原子力発電所運転停止以降の夏季の時期において、需給逼迫時の緊急対応が求められるなど電力系統の運用が年々厳しくなっている。このため発電分野の方策として、再生可能エネルギーを用いた発電方式に期待が高まっている。しかし、再生可能エネルギーを用いた発電方式は、自然条件に左右され安定した発電量が得られにくいいため、計画的に運用することが困難である。さらに、このような発電方式が電力系統に大量に連系した場合は、電力系統の電力品質および需給運用への影響が懸念される。

そこで本論文では、将来的に再生可能エネルギーの導入量の半数を占める太陽光発電、風力発電、水力発電を代表的な発電方式として取り上げ、一般電気事業者の視点で電力系統への導入拡大に伴う課題と対策について精査し、その方策を一提案するものである。

本論文は、全5章から成り、以下に各章の概要を記す。

第1章では、国内のエネルギー政策と再生可能エネルギーを取り巻く環境について述べ、再生可能エネルギーを計画的に導入拡大するには、「供給力の確保」と「送電網の整備」及び「広域連系の運用」が必要であることを論じ、研究目的と課題を明確にした。本研究では、如何に効率良く計画的に従来の発電方式と再生可能エネルギーを運用するかが焦点であり、設備対策ではなく解析技術による方策の必要性について論じている。

第2章では、東海地区における太陽光発電の導入拡大に伴う電力系統への影響と課題を整理し、対応策について論じている。太陽光発電は、面的に多地点で電力系統

に接続するため、全系周波数の維持など安定度が課題となる。このため、太陽光発電の出力変動に伴い揚水発電や火力発電を待機電源として計画的待機運転させる。その必要な待機電源の容量は太陽光発電の出力変動幅によって決まる。つまり、太陽光発電の発電量の上下限を精度良く把握・予測する必要がある。

そこで本研究では、出力変動と相関性の高い要因に着目し、『太陽光発電の発電量予測手法』を導出した。具体的には、全天日射量の変動領域（上限・下限）を灰色理論にて推定し、その後予報気温と過去の全天日射量を入力情報としたニューラルネットワークを用いて全天日射量を予測する。そして、予測した全天日射量から発電電力量を簡易式にて算出するものである。実績値と比較検証・評価した結果、天候および気温データのみの簡易的な手法でありながら、発電量の変動領域（上限・下限）を適切に予測できており、十分に適用可能な手法であることを確認した。

第3章では、東海地区における風力発電の導入拡大に伴う電力系統への影響と課題を整理し、対応策について論じている。風力発電は、風況が良い立地は局地的であり電力系統の末端に接続している箇所が多い。このため、電圧維持・高調波など局所的な電力品質が課題となる。これらの課題に対処するには、電圧安定化装置の導入、AFC容量の増大、事故時運転継続などの対策が挙げられる。これらの対策を検討する際には、まず計算機シミュレーションで系統に与える影響を把握する。しかしながら、瞬時値・実効値解析が可能なモデルを個別に構築することは、モデルの整合性・保守・コスト等の面から制約が大きい。また、自励式変換器を有する風力発電の解析は、シミュレーションに要する時間が長くなるため、解析モデルの高速化が必要となる。

そこで本研究では、瞬時値・実効値の両解析を可能とする『風力発電の高速シミュレーションモデル』を瞬時値ベースで開発した。具体的には、実効値解析時には周波数変換部分のスイッチング回路を可変電圧源・可変電流源で簡略化する手法を提案し、シミュレーション時間の高速化を図っている。なお、多岐にわたるパラメータの調整は、様々な型式の風力発電設備で行った諸試験の実測値を用いて設定した。実測値と比較検証した結果、起動・停止から通常運転、系統事故時など様々な運用状態での挙動を精度良く再現できており、実機に忠実な解析モデルであることを確認した。また、従来モデルと比較して1/100程度の計算時間となり、シミュレーション時間の高速化を実現した。これにより、風力発電の系統連系に伴う電圧対策や系統故障時などの解析を詳細か

つ効率的に行えることを確認した。

第4章では、東海地区における太陽光発電・風力発電の導入拡大に伴う電力系統への影響を緩和するための一方策として、水力発電設備による対応について論じている。水力発電は、ダムにより大容量のエネルギーを蓄えることが可能なため、計画的に発電することができる。さらに太陽光や風力発電などによる急激な出力変動分を系統側で吸収するのに最も有効的な方策の一つが、可変速型水力発電機による運転である。しかしながら、利用可能な水力資源の殆どが開発され尽くしており、新規にダムを開発するには多大な時間を要すると共に環境に与える影響が大きいと容易ではない。また原子力発電の停止や再生可能エネルギーの増加に伴い、余剰電力の発生する時期・時間帯がこれまでの運用とは異なってきており、計画的な揚水運転・発電が容易では無くなっている。従って、現在使用できる水力発電設備を有効利用する必要があり、系統運用とダム管理面において、降雨後のダムへの流量の通減状況を精度良く把握（予測）することが重要となる。

そこで本研究では、クラスタ分析で入力データを分類し、ニューラルネットワークで学習を行う『発電用ダムの流入量予測手法』を導出した。具体的には、基底流量、ピーク降雨までの累積雨量及び降雨強度、ピーク降雨後の降雨強度及び降雨時間を入力データとし、クラスタ分析で分類を行う。分類した同データ群にてニューラルネットワークで学習を行い、降雨後のダムへの流入量の通減時定数を推定する。得られた通減時定数の予測値を用いて通減曲線（当日、翌日の流量変化）を求めるものである。矢作川上流域を対象に実測値を用い見出した手法の精度検証・評価を行った結果、簡易的な手法ながら降雨後のダムへの流量の通減状況を精度良く再現できており、十分に適用可能な手法であることを確認した。

第5章では、本研究を総括し今後の展望について記している。

以上に述べたように、原子力発電所運転停止以降、電力需給の逼迫時における緊急対応が求められるなど電力系統の運用が年々厳しくなっている。このような状況において、再生可能エネルギーを用いた発電方式の導入拡大により、将来的に電力系統の電力品質や電力供給信頼度を維持し、柔軟で安定な電力運用に対する問題解決のためにも、本研究成果が期待される。

以上により、本研究の成果は学術上、工学に寄与するところ大である。よって、審査委員会は本論文提出者 山田富士宏氏を博士(工学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。