

## 論文の内容の要旨

論文題目 離島系統における送水システム及び海水淡水化装置の消費電力制御による再生可能エネルギー電源出力変動補償手法の研究

氏 名 今中 政輝

本論文は、離島での太陽光発電や風力発電などの変動性再生可能エネルギー電源 (Variable Renewable Power: VRP) 大量導入時の需給バランス維持のため、既存の海水淡水化装置および送水ポンプの消費電力制御を提案する。水道機器は貯水槽に十分な水がある限りは消費電力制御が水利用者に悪影響を及ぼさない点で、制御に適した負荷である。本研究での主要な問いは、「可変速制御された淡水化施設と送水システムは機器所有者の供給信頼性と効率性を損ねないで、どの程度離島の再生可能エネルギー電源の変動対策に貢献できるのか？」ということである。具体的には以下の点について論じた。

- \_ 外部条件および制御量からの、圧力・流量・消費電力の解析
- \_ 制約を考慮した消費電力制御可能幅と効率向上効果の算定
- \_ 消費電力制御による過渡特性および太陽光発電変動抑制効果の検証
- \_ 貯水量制約を考慮した運用法の検討

第一章では論文の背景と目的についてまとめた。目的は上述の通りである。大規模系統との連系のない独立離島系統では既存の内燃機関発電機の燃料費が高いため、VRPの導入が温室効果ガスとともに発電費用も削減する可能性があり、導入が進められてきた。さらに固定価格買取制度の導入以降、太陽光発電の導入が急速に進んでいる。

しかし電力の需給バランスの観点からはVRPの大量導入は周波数変動および内燃機関発電機の下げ代問題が懸念されるため、VRPの新規導入が制限される離島系統が増加している。対策法として、エネルギー貯蔵装置の導入やVRPの出力抑制は既に実用化されてきているが、エネルギー貯蔵装置は高価であり、出力抑制は発電機会の損失につながるため、これらの使用はそれぞれ最低限に抑えたい。そこで、既存の負荷、特に電気自動車やヒートポンプ機器の消費電力制御に注目が集まっている。しかし電気自動車は現時点では導入台数が少なく、ヒートポンプ機器は消費電力の制御が難しく応答性も遅いという課題があるため、より応答性に優れ、容易に制御可能な負荷が求められている。

第二章ではまず消費電力制御上の要件を、機器所有者および電力制御者の観点から整理した。機器所有者の観点からは、供給信頼性の確保のため貯水槽の水位および水質維持と機器劣化を考慮する必要がある。また経済性確保のために淡水化装置では単位電力量あたりの水生成量、送水ポンプでは送水量で表される効率性が重要となる。一方、電力制御者の観点から見ると、変動対策への貢献能力の指標として、制約条件下での消費電力制御可能幅と応答速度が重要となる。

次に容量に関する検討を行った。淡水化施設は中小規模離島で大電力を消費する機器の一つであり、島のピーク負荷の10%以上の定格容量を持つ場合が多いと推測される。送水ポンプは日本中に存在し、その原動機の定格出力合計は上水道設備だけでも日本の風力発電設備容量に匹敵する2786MWにもなる[水道統計, 2012]。

再生可能エネルギーと淡水化施設や送水ポンプを組み合わせる研究は世界的には多数行われているが、淡水化装置では多くが系統から独立したシステムを想定しており[Kalogirou, 2005]、本研究のように系統に連系し消費電力制御対象とする例は少ない。送水ポンプの消費電力制御研究は台数制御を前提にしたシミュレーションが多いが、離島系統のように高速な変動への対応が求められる場合には、可変速制御されたポンプの実機特性に基づいた研究が求められている。

第三章では共通する部分に関する整理やモデル化を行った。消費電力の制御可能幅および効率性の検討には、入力条件と外部条件からシステムの圧力・流量・消費電力を解析するモデルが必要となる。

本論文では機器の特性

モデルを用いて、主に代数方程式によって簡便な解析可能なモデルを提案した。図1は可変速制御された淡水化装置および送水ポンプに共通する部分の概略である。淡水化装置と送水ポンプには消費電力制御対象として見た場合には類似点が多く、圧力損失要素以外は共通のモデルで記述可能であることを示した。

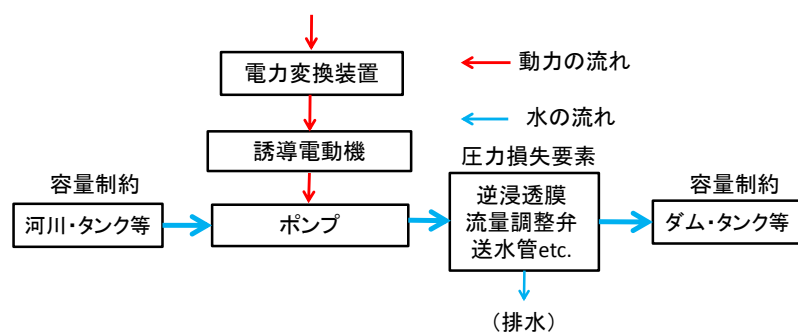


図 1 可変速制御された淡水化装置および送水ポンプの共通部分のモデル

第四章では淡水化装置のモデル化と消費電力制御可能範囲(可制御幅)の解析を行った。淡水化装置のモデルは電力変換装置出力周波数(以下、周波数)と濃縮水の流量調整バルブ開度を制御量、原水塩分濃度と温度を外部条件として入力し、各動作点での圧力・流量・消費電力を解析する。逆浸透膜のモデルには純水透過係数を温度と圧力の関数とした膜透過の簡便式を用い、流量調整バルブも開度ごとに比例係数が決まるオリフィス特性でモデル化してある。小規模な試験装置を用いてモデルの係数同定と精度の検証を行い、モデルは試験結果の特性を再現することができた。

さらに淡水化装置には膜保護や水質維持のために様々な制約があるが、先行研究では制約条件を満たす動作範囲を安全動作領域(Safe Operation Window: SOW)として定義し、淡水化装置をその領域内で動作させることが提案されている[Feron, 1985]。本研究ではSOWを用いてそれらの制約条件を満たす範囲での消費電力の上下限を決める手法を提案し、解析と試験によって検証した。消費電力可制御幅上下限の外部条件依存性についても検討を行い、塩分濃度と消費電力は正の相関、水温と消費電力は負の相関があることを確認した。

また、各消費電力指令値に対して安全動作領域内で水生成効率を最大化する動作点の決定法も示し、それらが逆浸透膜の流量比制約ないし濃縮水流量制約の制約限界点であることを試験およびモデルで確認した。これにより、各消費電力指令値において最も効率的な水生成を可能とするバルブ開度が計算可能になった。

第五章では淡水化装置の過渡特性を確認するため、電力変換装置出力周波数制御によるステップ・ランプ応答特性および正弦波応答特性について検討した。試験装置でのステップ応答試験では、単純なフィードバック制御系でも時定数1~2秒程度で整定し、5秒以上の時間をかけたランプ応答試験では、指令値にほぼ追従した。正弦波応答試験でのBode線図を用いた解析により、この制御系では消費電力の応答性に原水塩分濃度およびバルブ開度の依存性があることを示した。正弦波応答試験結果は静特性と比較して水生成効率低下がほとんどないことが示された。

次に太陽光発電出力を指令値としての追従特性の検証を行った。消費電力をPI制御で周波数指令値にフィードバックする簡易な制御法でも、可制御幅内の太陽光発電変動を大幅に削減できた。さらに静特性モデルを用いた過渡特性シミュレーション手法を提案した。

第六章では、送水ポンプの静特性モデルの提案と小規模ポンプシステムでの実証試験を行った。モデルは周波数を入力とし、全揚程曲線と管路抵抗曲線から動作点を決定する。さらにモデルを多数台の送水ポンプ群が並列運転される系に拡張した検討も行った。特に多数台のポンプ群に関する解析では、他のポンプの吐出流量により可変速制御時のポンプ消費電力の上下限に影響を受けることが示唆された。

制約条件下での効率性の解析結果からは、送水ポンプでも定格運転時よりも部分負荷運転時の方が低圧であるため送水効率が高くなる傾向が確認された。

第七章では送水ポンプの過渡特性を確認するため、まずステップ・ランプ応答特性および正弦波応答特性の検討を行った。ステップおよび高速のランプ応答試験では、圧力・流量および消費電力が最終的な安定値に達する前に最大 2 秒程度別の値で一定になる現象、二段応答が見られた。本論文では二段応答の原因が圧力サージであることを示し、その大きさを示すジューコフスキーの式を組み込んだ過渡特性モデルで二段応答過渡特性を再現できることを示した。正弦波応答試験結果は時定数 2 秒以上において周波数による効率低下は確認されなかった。

次に太陽光発電出力を指令値とし、過渡特性モデルを用いたフィードフォワード制御による変動抑制効果の検証を行った。さらに高速追従を目的としたデッドビート制御を提案し、その効果を検証した。

水の供給信頼性の維持と消費電力制御の両立を目的に、送水ポンプを例として貯水槽の水位を考慮した消費電力制御手法を提案した。試験サイトのポンプおよび貯水量制約に基づいたシミュレーションによる効果の検証を行った。提案した PI 制御法と送水量計算制御法についてそれぞれパラメータの最適化を行い、貯水量制約を満たしながら太陽光発電変動を抑制可能であることを示した。

以上の議論をふまえ、第八章では淡水化装置と送水ポンプの可制御負荷としての特徴をまとめた。可変速制御された淡水化装置と送水ポンプはともに高速な応答特性を持った消費電力制御対象であり、その貯水槽は定格流量の数時間分以上の容量を持つことが多いことから、幅広い周波数帯の VRP 変動に対応できる可能性を持つ。消費電力制御可能幅は淡水化装置の場合には塩分濃度と温度、送水ポンプの場合は送水圧力によって変化するが、いずれの場合も本論文が提案した静特性モデルの手法を用いて計算可能である。さらに部分負荷運転時に効率が定格時よりも高くなる傾向があることから、常時は部分負荷の高効率点で運転しておけば、系統側からの指令に合わせて消費電力の増加も減少も可能である。第八章の最後に、小規模離島系統と大規模離島系統のそれぞれについて、淡水化装置と送水ポンプの運用法について論じ、本論文で提案した消費電力可制御幅や効率の同定や貯水量制約の制御法の活用の可能性を示した。