

論文の内容の要旨

論文題目 空調機器を可制御負荷として用いた短周期電力変動補償
システムの設計手法及び実証検討

氏 名 河内 駿介

太陽光発電や風力発電など、出力が変動する再生可能エネルギー電源が大量に導入された電力系統においては短周期の電力変動補償のためのLFC調整容量が不足することが懸念されている。LFC調整容量の不足を補うための方策としては蓄電池など利用が有力とされているが、導入コストが高いといった問題等からより低コストで電力変動補償を行う手法の確立が求められている。

蓄電池とは異なる電力変動補償手法の一つとして、負荷の消費電力を系統運用者が制御して電力変動補償に活用する負荷制御の考え方が注目を集めている。本研究では負荷制御の中でも熱負荷機器、特にヒートポンプ空調システム(HPACS)の制御に注目し、マイクログリッド内部でHPACS消費電力制御を行うシステムについて、機器の特性取得、制御系設計手法の提案、実証試験設備を用いた実証試験、系統周波数制御への貢献能力の評価を行い、有用性及び実現可能性を示す。

本論文は全7章で構成され、各章の概要及び主な内容は下記の通りである。

第一章では再生可能エネルギー電源大量導入に伴って電力系統で生じることが懸念されている問題点や、その解決に向けた負荷制御以外の研究例等の背景を論じ、本研究の位置づけ及び目的を述べている。

第二章では需要家機器制御の考え方とその近年の研究例について論じた後、ヒートポンプシステムの概要について述べている。またHPACSについて負荷に占める割合などから可制御負荷としての適用可能性について論じた後に本研究で用いるHPACSの仕様について述べている。

第三章では実機試験によって得られた空調用ヒートポンプの基礎特性について述べている。基礎特性取得試験では既存品のHPACSに対して、COPの部分負荷特性、消費電力指令値追従特性及び消費電力変化時の生成熱量変化の動特性を測定した。COP部分負荷特性測定では、HPACSのCOPを消費電力及び冷温水入口温度と外気温の温度差との関数として表現する近似式を算出した。また、正弦波消費電力指令値応答試験の結果より正弦波消費電力指令値を与えた場合のCOPは、同条件で定常運転を行った場合のCOPとほぼ同じであることを確認した。消費電力指令値追従特性測定では正弦波消費電力指令値応答試験の結果よりHPACS消費電力のBode線図を作成し、HPACSの消費電力指令値追従特性測定が一次遅れ系で近似できることを示した。HPACSの消費電力を最低出力から最大出力の幅で変化させた場合、HPACSは120秒程度の周期の変動に追従できることを確認された。

生成熱量の動特性についてもBode線図を作成し特性を一次遅れ系で近似した結果、生成熱量はおよそ時定数 $250/2\pi$ 秒の一次遅れで消費電力に追従することが明らかになった。生成熱量の動特性についてはHPACSの利用者の利便性について検討を行う際に有用なデータとなるものである。

第四章では空調用ヒートポンプを可制御負荷として用いた電力変動補償システムの制御設計手法について論じている。ここではHPACSと蓄電池を含むマイクログリッドにおいて電力変動補償を行う制御系を考え、HPACSの蓄エネルギー量制御と蓄電池のSOC制御の制御パラメータ決定手法を示した。提案手法では補償すべき電力変動からマイクログリッドの連系点潮流・HPACSの蓄エネルギー量変動・蓄電池SOC変動といった変動量までの伝達関数をそれぞれ計算し、電力変動の周波数スペクトルを掛け合わせることでこれらの変動量の周波数スペクトルを算出している。算出した各種変動量の周波数スペクトルを用いて、パワースペクトル密度の周波数領域での積分を行いその平方を取ることによって、連系点潮流変動・HPACS蓄エネルギー量変動・蓄電池SOC変動の標準偏差を求め、これらの値から各種変動量を評価するための評価指標を計算している。マイクログリッド制御パラメータを網羅的に変化させた場合に、これらの評価指標の組み合わせがパレート最適となる集合を一覧としてまとめ、許容される変動抑制率やHPACS蓄エネルギー変動量・蓄電池SOC変動量などから制御で用いる制御パラメータの値を求めることができる。論文内では発電機とHPACS・蓄電池の組み合わせで構成されるマイクログリッド数パターンについてパレート最適となる制御パラメータ組み合わせの集合を求め、構成

パターンによる違いを検討した。伝達関数の周波数特性を元にパラメータの決定を行う本手法では、補償すべき周波数領域の変動を直接評価しながら制御パラメータの設計が可能となる。本手法で求めたパラメータを用いてHPACS消費電力制御を含むマイクログリッド電力変動補償のシミュレーションを行い、変動量の傾向が設計方針通りであることを確認した。

第五章では、GE・HPACS・NiMH電池の3つの機器からなるマイクログリッド実証試験設備において電力変動補償システムを構築して実際の負荷変動に対して電力変動補償制御を行い、マイクログリッドの変動補償率、NiMH電池のSOC変動量、HPACSの熱出力変動などを測定・解析した結果を述べている。実証試験はGE・HPACS・NiMH電池の3つの機器の組み合わせについて複数パターンで実施し、一部の組み合わせについては制御パラメータを複数通りに変化させて実施した。試験結果より、HPACSとNiMH電池を組み合わせで制御することで、単にNiMH電池のみで制御するよりも大幅にNiMH電池のSOC変動幅(即ちNiMH電池の必要エネルギー容量)を削減できることが確認された。一方で、HPACSの熱出力の変動による利用者利便性への影響について室温モデルを構築して検証した結果、HPACS消費電力制御の結果として生じる室温変動は1℃未満であり、在室者の熱的快適性はほとんど損なわれないことが確認できた。また蓄熱槽モデルを用いて実験したケースにおいても、蓄熱量変動は蓄熱槽容量を上回る大きさではないことを確認した。また、GE・HPACS・NiMH電池の組み合わせでは、GEとNiMH電池のみ組み合わせと比較してGEの出力変動が約40%程度小さく抑えられており、GE出力幅のより多くを系統の予備力として使うことができることを示唆する結果が得られた。さらに、自立運転状態のマイクログリッドにおいてHPACS消費電力制御を適用した場合についてシミュレーションを実施し、マイクログリッドの周波数変動を悪化させることなく、必要なNiMH電池の容量を削減できることを示した。

第六章ではマイクログリッドにおける電力変動補償による系統周波数制御への貢献能力の評価について論じている。検討では負荷・ベース電源・火力発電機・水力発電機・系統設置蓄電池及びマイクログリッドで構成されている系統についてマイクログリッドの制御パラメータを変化させて変動抑制率が変化した結果として系統側発電機のLFCに相当する出力変動がどのように変化するかを確認した。マイクログリッドの制御パラメータ設計時と同様に電力変動源から各発電機及び系統蓄電池出力・系統設置蓄電池SOC変動・マイクログリッド内蓄電池SOC変動までの伝達関数を計算し、電力変動源の周波数スペクトルを掛け合わせることで各変動量の周波数スペクトルを算出した。各発電機及び系統設置蓄電池出力の周波数スペクトルを足し合わせてLFCに相当する周波数領域についてパワースペクトル密度の積分を行い、平方を取ることで系統側のLFC領域相当出力変動の標準偏差を算出し、LFC必要容量の指標とした。系統設置蓄電池SOC変動及

びマイクログリッド内蓄電池SOC変動についても同様にパワースペクトル密度積分によって標準偏差を算出し、変動量評価指標とした。これらの指標とマイクログリッド変動抑制率の関係を調べた結果、LFC必要容量とマイクログリッド内蓄電池SOC変動量との間にはトレードオフの関係があることが確認できた。一方、系統設置蓄電池のSOC変動はマイクログリッド変動抑制率の影響をほぼ受けないことが確認された。

最後に第七章において本論文で得られた知見をまとめ、成果を示している。

本研究は民生部門の負荷機器の中でも消費電力に占める割合が比較的大きい機器であるHPACSについて、消費電力制御による電力変動補償の有効性と実現可能性を示すものであり、今後の電力系統における負荷制御の実用化に資するものと考えられる。