

論文の内容の要旨

論文題目 都市型マイクログリッドにおけるエネルギー
貯蔵装置の運用計画および運転制御に関する研究

氏 名 下田 英介

近年、太陽光発電や風力発電などに代表される再生可能エネルギーを用いた発電や、熱電併給によりエネルギー利用効率の向上を図る天然ガスコージェネレーション発電機などの導入拡大が政策的に進められている。しかし、これらの分散型電源が電力系統に大量に導入されると、電力系統の電力品質や供給信頼性に影響を及ぼすことが懸念されている。また一方で、2011年3月11日に発生した東日本大震災以降、エネルギーセキュリティの考え方が見直されてきており、防災拠点や企業の生産施設などでは、需要地端での電力供給継続の必要性に対する関心が高まっている。これらの要求を満足する技術として、天然ガスコージェネレーション発電機や太陽光発電等の自然エネルギーを含む複数の分散型電源を用いて電力と熱の小規模ネットワークを構築し、需要変化に合わせて設備群を最適制御することで需給バランスを維持した電力供給を行うマイクログリッドが注目されている。マイクログリッドの運転形態は次の二つに大別することができる。

① 通常時の連系運転

マイクログリッドの受電点（以下、連系点）における電力潮流が一定になるように、応答特性の異なる複数の分散型電源を組み合わせることで負荷追従運転を行う。負荷追従運転を行うことで、マイクログリッド内の負荷変動や太陽光発電などの出力変動が電力系統側から観測されなくなるため、電力供給の信頼性向上に寄与することができる。

② 非常時の自立運転

万一、電力系統に停電が発生した際には、マイクログリッドを電力系統から切り離して分散型電源のみで電力供給を行う。自立したマイクログリッドは電力系統に比べて系統容

量が極めて小さいため、電圧や周波数といった電力品質が変動しやすく、電力品質を安定化させるためには、応答性の優れている蓄電装置などを用いて積極的に需給バランスをとらなければならない。また生産施設など常に高い電力品質を求められる建物では、連系／自立運転の切替において、無瞬断での運移行、安定した自立運転の継続、そして連系復帰が求められる。

本研究では、都市部に構築されたマイクログリッドにおいて二つの運転形態およびスムーズな運転形態の移行を実現するため、需要地端に今後設置の増加が予測されるエネルギー貯蔵装置に着目し、エネルギー貯蔵装置の運用計画および運転制御に関する方法を検討する。具体的には、以下の5点について検討を行う。

・都市型マイクログリッドの定義

マイクログリッドは大別して都市型と遠隔地型に分類することができるが、それぞれ求められる役割や供給対象が異なるため運用方法が異なってくる。本研究では、都市型マイクログリッドに必要な機能の定義を行うと共に、その機能を実現するための要件についてスマートグリッド構造モデルを用いて規定する。

・都市型マイクログリッドにおける電力負荷予測

マイクログリッドは極めて小規模な電力システムと考えることができるため、通常時である連系運転の際には一般の電力システムで用いられている需給調整機能の考え方を流用できる部分も多い。具体的には、数十分以上の周期で変動する負荷変動に対する電源の出力分担は、運転計画の立案によってエネルギーコストの削減やCO2排出量の削減が最大限に得られるように決定すべきである。これにより需要家は需要地端で発電を行うメリットを享受することができ、マイクログリッド導入へのインセンティブとなる。運転計画の立案に当たっては、現時刻以降の長期的な（例えば24時間）電力負荷の見通しが求められるため、電力負荷予測が必要となる。電力負荷予測の精度が十分に得られないと、運転計画で立案した電源の出力分担をリアルタイムの需給調整によって大幅に修正しなければならないので、経済性などが悪化してしまう恐れがある。電力負荷予測における先行研究では、負荷電力が気象条件と強い相関を持つこと、日負荷曲線に周期性が強いこと、が経験的に示されていることから、過去の負荷電力実績と気象条件、および気象予報より重回帰分析やニューラルネットワークを用いて電力負荷予測が行われている。本研究では、都市型マイクログリッドが構築される建物一棟～数棟規模では、電力負荷変動と空調設備の稼働状態との間に強相関がある点に着目し、空調設備の稼働状態の推定から電力負荷予測を行う手法を採用することで、都市型マイクログリッドにおける精緻な負荷電力予測が可能であることを実際の建物を用いて試験、評価する。結果、実際に使用されている建物において高精度な電力負荷予測ができることが確認された。

・蓄電池を用いた電源運転計画

電力負荷予測後には、分散型電源の運転計画の立案によってエネルギーコストの削減やCO2排出量の削減が最大限に得られるようにする。ただし、マイクログリッドにおいてはエネルギー貯蔵装置の全電源に占める割合が地損の大規模電力系統に比べて大きいという特徴があるため、エネルギー貯蔵装置の運転計画立案手法が必要となる。エネルギー貯蔵装置の運転計画を立案する際には、その充電状態（State of Charge:SOC）が常に所定の運転範囲に納まるようにしなければならない。蓄電池の充電状態は一般に直流電流の流入出量の積分値から決定されるため、交流電力出力ではなく直流電流出力を把握しなければ、運用時において計画時に見積もった充電状態を大きく逸脱してしまう恐れがある。そこで本研究では複数種類の蓄電池に対し、さまざまな充電状態、充放電電力に対する直流電圧、直流電流特性を明らかにし、直流特性に基づいた運転計画の立案手法を提案する。実機による運転結果と運転計画に推定したエネルギー貯蔵装置の充電状態を比較することで本手法の有効性を検証する。また蓄電池の有効活用という観点から、負荷予測の誤差や連系点潮流の変動抑制が、エネルギーコストの低減にどの程度悪影響を及ぼしうるのかについてもシミュレーションを用いることで合わせて検討を行う。直流電圧と直流電流とSOCの3値はそれぞれ線形関係があることが明らかになり、この線形性を用いることで運用計画時に精度よく推定することが可能となった。

・都市型マイクログリッドにおける自立運転制御手法

マイクログリッドを構築することによって得られる重要な機能の一つとして、商用系統の停電時などに安定した電力を供給する自立運転がある。先行研究として、交流発電機と蓄電装置を組み合わせたマイクログリッドにおいて、安定した電力品質での自立運転を実現するため、電源間で協調した負荷分担を行う「統合カスケード制御」と呼ぶ分散型電源の制御手法を開発されている。具体的には交流発電機が主となる電力を供給すると共に、周波数、電圧制御を行うことで基準となる周波数、電圧を生成し、系統連系時の電力系統の役割を担う。蓄電装置は応答特性に応じて速い負荷変動成分を補償することで、交流発電機の速い出力変動を抑制し、高品質な電力の供給を維持する。

本研究では、統合カスケード制御を拡張し、周波数、電圧制御を行う電源が交流発電機、インバータ電源を問わず適用可能となる分散型電源の制御手法を用いる。制御手法の有効性を検証するため、交流発電機が周波数、電圧制御を行う場合については、実証設備に本制御を適用し、72時間の実機による連続自立運転で確認を行う。またインバータ電源である蓄電装置が周波数、電圧制御を行う場合についても、安定した自立運転が実現できることを、シミュレーションを用いて合わせて検証する。結果、様々な電源の組み合わせに対して電力品質を維持した自立運転が可能となった。

・自立運転移行時の電力品質安定化制御

連系時と自立時では、すべての分散型電源の運転方法は異なっている。従って分散型電源が電力系統から切り離れている状態でこれらの電源が連系時の運転制御で動作してしまうと、マイクログリッド内の電力品質が不安定になる恐れがある。マイクログリッドを連系運転から自立運転へ電力品質を確保しながら移行させるためには、エネルギー貯蔵装置を用いた高速な運転制御が重要であり、その制御方法には2通りの手段が考えられる。1つは連系／自立の制御モードを高速に遷移させることで制御の移行時間を極力を短くする方法であり、もう1つは連系／自立移行／自立の3状態を同時に満足するような制御系を構築することで制御モードの遷移そのものを省略する方法である。

本研究では後者の実現方法について提案を行い、実機およびシミュレーションによる自立運転移行時の電力品質安定化の度合いを評価する。実機を用いて自立運転移行時の電力品質安定化の度合いを評価した結果、提案制御の導入により、自立移行時における発電機出力変動を連系点潮流の約7分の1まで低減することができ、自立移行時における電力変動を大きく低減することができた。