

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 蔡 思楠

蔡 思楠の博士論文は、以下の 7 章から構成されている。

まず 1 章では、再生可能エネルギーの大量導入の現状を示し、再生可能エネルギーの増加による従来の電力システムへの影響を調査し、尚且つ、世界中への電動自転車（EV）の普及状況を紹介すると共に、本論文の目的と貢献について説明している。また、本論文全体の構成を明らかにしている。

次に 2 章では、電力システムにおける需給制御、特に、本論文の中心となっている負荷周波数制御について説明している。そして、再生可能エネルギーの増加により、容量が大きく、かつ反応が早い負荷周波数制御が電力システムに必要とされていることも説明している。システムの周波数制御性能を向上させるための **Performance-based** 調整力市場を紹介したのち、一例として **PJM** の調整力市場のメカニズムについて説明し、本論文における調整力市場メカニズムを説明している。さらに、本論文におけるシステム周波数シミュレーションモデルについて説明している。

次に 3 章では、EV を用いて電力システムに周波数調整力を提供することについて説明している。調整力市場に参加するため、複数の EV を集め、EV アグリゲータによって各 EV の充放電を制御しなければならない。この過程において、EV アグリゲータには二つの問題がある。一つ目は周波数制御信号の遅延であり、二つ目は、各 EV への制御信号の分配手法である。この二つの問題を説明したのちに、本論文における EV アグリゲータの事業スキームも示している。

次に 4 章では、周波数制御信号の遅延を補償する制御手法を提案した。定周波数制御(FFC)方式を採用した電力システムにおいて、周波数制御信号はシステムの周波数により計算されている。そのため、周波数制御信号とシステムの周波数の関係を解明した上で、EV が置かれている需要端で計測したリアルタイムのシステムの周波数に基づき、遅延のない制御信号を EV 側で再構成することで、EV の周波数調整力の性能を高めることができる。周波数制御信号とシステムの周波数の関係の解明するため、線形回帰と適応制御、二つのアルゴリズムを採用することを提案した。シミュレーション結果より、提案した制御手法は EV アグ

リゲータのパフォーマンスを高められることを定量的に確認した。特に、周波数の測定ノイズが大きい場合においては、適応制御は線形回帰より安定かつ正確であることも明らかにした。

次に 5 章では、周波数制御信号の分配手法を提案した。従来の分配方法は、EV アグリゲータの利益を最大化するが、信号分配のタイムステップは LFC 市場の入札タイムステップ（基本的に 1 時間）と一致しているので、EV の利用率は高くない。提案した周波数制御信号の分配手法は、信号分配のタイムステップを短くすることを通して（例えば 15 分間）、EV の利用率を高め、EV アグリゲータの利益をさらに増加させる。また、信号の分配タイムステップを短くすると、EV アグリゲータの利益を最大化する最適化問題は非線形非凸となり、最適値を求めるのが難しい。そのため、提案した新たな遺伝的アルゴリズムにより、この最適化問題を速く解くことができる。シミュレーション結果より、提案した分配手法は EV アグリゲータの利益をさらに増加させるだけでなく、各 EV の電池充電量をより正確に制御できることも明らかにした。

次に 6 章では、4 章の遅延を補償する制御手法と 5 章の周波数制御信号の分配手法を統合し、EV アグリゲータのための新たな系統負荷周波数制御手法の全貌を明らかにした。SARIMA モデルを用いて調整力市場の価格を予測したのちに、モデル予測制御により各 EV への制御信号の分配を確定する同時に、各 EV のもとで受けた信号の遅れを補償する。シミュレーション結果より、提案した制御手法は EV アグリゲータの利益を約 30 パーセント増加させた。尚且つ、本博士論文において提案した EV アグリゲータのペイバックタイムと、EV の不確実性についても説明している。

次に 7 章では、結論を述べている。すなわち、Performance-based 調整力市場においては、本論文で提案した EV アグリゲータのための新たな系統負荷周波数制御手法は EV アグリゲータの利益を増加させることができる。さらに、再生可能エネルギーが大量導入されている電力システムの周波数制御にも役立つことを明らかにした。

以上を要するに、本論文は、周波数制御信号の遅延補償システムと周波数制御信号の分配システムの開発の両面から、EV アグリゲータのための新たな手法を提案し、電力システムの周波数調整能力の向上に貢献すると共に、EV アグリゲータの事業性を向上させ、提案システムの優れた性能を明らかにしたもので、電気工学、特に電力システム工学の発展に資するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。