

## 学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	直流キャパシタ電圧一定制御を用いた電気自動車用スマートチャージャの高調波補償 (Harmonic Current Compensation With Constant DC-Capacitor Voltage-Control-Based Strategy of Smart Charger for Electric Vehicles)
氏 名 (Name)	西川 慧

電気自動車が実用化され、本格的な普及期を迎えている。電気自動車は、大容量のバッテリーが搭載されていることから移動可能な蓄電池としても注目されている。この大容量のバッテリーを活用した Vehicle to Home (V2H) および Vehicle to Grid (V2G) が提案されている。電気自動車のバッテリーに蓄えた電力は、電力需要が逼迫した電気代の高い昼間に家庭に融通することができる。これを V2H という。これらを実現するためには、双方向バッテリーチャージャが必要である。我が国では、家庭用低圧配電方式として単相 3 線式配電方式が用いられている。単相 3 線式配電において、パワーエレクトロニクス機器を含む様々な種類の家電機器が接続されるため、電源電流は振幅と位相が異なる高調波を含んだ電流波形となり電力品質が低下している。一方、電力小売自由化により積算電力量計からスマートメータへの置き換えが行なわれている。スマートメータは、デジタル演算方式プログラマブル電力量計であり、電力会社は家庭の電力品質をオンデマンド時間ごとに把握することが可能である。今後スマートメータの普及により、不平衡および高調波電流を発生し電力品質を悪化させる需要家には割増料金制度が導入される可能性があり、近い将来、各需要家に電力品質保証の義務が生じることが予想できる。このような背景から、申請者が所属している研究グループでは単相 3 線式配電の電力品質機能を有する電気自動車用スマートチャージャを提案し、その有効性を明らかにしている。本学位申請論文では、負荷電流が不平衡で、かつ、高調波電流が含まれている場合のみならず電源電圧に高調波電圧が含まれた場合の電気自動車用スマートチャージャの電力品質保証効果を明らかにし、より実用性の高い制御法を論じている。

第 1 章および第 2 章では、研究背景および関連する国内外の研究動向について論じている。特に、100 Vrms/ 200 Vrms の家電機器が混在する単相 3 線式配電方式は我が国と台湾で用いられているものであり、欧米諸国の研究者らが提案している電力保証機能付き電気自動車用双方向チャージャが適用できないことを明らかにし、申請者等が提案している電気自動車用スマートチャージャの有用性について明らかにしている。また、電力品質保証を実現するためのアクティブパワーラインコンディショナの制御方式として、三相回路の瞬時有効無効電力理論(p-q 理論)と三相回路の瞬時有効無効電力理論を単相回路に応用した単相 pq 理論を詳細に述べている。これに対し、申請者等の研究グループで提案してきた直流キャパシタ電圧一定制御だけを用いた制御方式の有用性を明らかにしている。しかしながら、単相回路では第 3 次調波が残存し電力品質保証効果を悪化させることを詳細に明らかにしている。

第 3 章では、電源側の高調波補償特性の改善を目的としたスマートチャージャの電流制御法について検討を行っている。第 2 章で明らかにしたように、単相回路では支配的な第 3 次調波を補償可能な第 3 次調波に同期した  $d-q$  座標上の電流フィードバック制御を提案し、その有効性を明らかにしている。また、基本波および第 3 次調波に同期した  $d-q$  座標上の電流フィードバック制御を実現するためには、スイッチング周波数を基本波 60Hz と第 3 次調波 180Hz の公倍数とする必要があることを明らかにしてい

る。シミュレーションおよび実験結果により、第3次調波を補償することで電源電流のTHDを大幅に低減可能なことを明らかにしている。

第3章において、電源側の力率を1.00に制御されており変換機の容量が増大する問題がある。そこで第4章では、無効電力調整機能を有する電気自動車用スマートチャージャの高調波補償法について検討している。スマートチャージャを構成する3レグ方式PWM整流回路のパワーフローおよび電源電圧、電源電流、負荷電流および補償電流のフェーズ図により、電源側の力率を0.90に制御可能でかつスマートチャージャの変換器の容量を低減可能なことを明らかにしている。さらにシミュレーションおよび実験結果により、提案したスマートチャージャの制御法の有効性を明らかにしている。実験結果より、スマートチャージャ充電動作時において変換器容量を26%低減可能なことを明らかにしている。

配電系統に高調波電流が流れると、系統のインピーダンスにより高調波電圧が発生する。これまで提案してきた直流キャパシタ電圧一定制御を用いたスマートチャージャの制御法では、電源側に高調波電圧が含まれている場合について制御性能を検討していない。そこで第5章では、電源電圧および負荷電流が歪んだ場合における電気自動車用スマートチャージャの高調波補償法について検討している。電源電圧を、IEEE standard 519™-2014では、THDの最大値が5%で、かつ、各次数の基本波成分に対する割合を3%以下とするように定められている。そこで、これらの指針を考慮して電源電圧を単相回路で典型的なフラットトップ電圧波形で模擬している。パワーフローを詳細に検討し、電源電圧および負荷電流が歪んだ場合でも電源側で平衡状態の正弦波で、かつ、力率が1.00の電源電流が実現できることを理論的に明らかにしている。さらに、シミュレーションおよび実験結果により、電源電圧および負荷電流が歪んだ場合における提案したスマートチャージャの制御法の有効性を確認している。

第6章では、電源電圧および負荷電流が歪んだ場合における電気自動車用スマートチャージャの無効電力調整法について検討を行っている。第5章では、電源側の力率は1.00に制御されているが、スマートチャージャの変換器容量が増大する問題がある。そこで、第4章で提案した無効電力調整法を応用し、電源側の力率を0.90に制御することで、スマートチャージャの変換器容量を低減可能なことを明らかにしている。パワーフローを詳細に検討し、電源電圧および負荷電流が歪んだ場合でも電源側で平衡状態の正弦波で、かつ、力率が0.90の電源電流が実現できることを理論的に明らかにしている。シミュレーションおよび実験結果により提案したスマートチャージャの制御法の有効性を確認している。実験結果より、スマートチャージャ充電動作時に第5章の実験結果と比較し、変換器容量を27%低減可能なことを明らかにしている。

第7章では、本学位論文で得られた研究成果の結論を述べている。さらに、今後の検討課題について述べている。

(様式 9 号)

## 学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	西川 慧
審査委員	主 査： 田中 俊彦
	副 査： 山口 真悟
	副 査： 若佐 裕治
	副 査： 西藤 聖二
	副 査： 山田 洋明
	副 査： 和田 圭二
	副 査： 池田 風花
論文題目	直流キャパシタ電圧一定制御を用いた電気自動車用スマートチャージャの高調波補償 Harmonic Current Compensation With Constant DC-Capacitor Voltage-Control-Based Strategy of Smart Charger for Electric Vehicles
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>電気自動車が実用化され、本格的な普及期を迎えている。電気自動車は、大容量のバッテリーが搭載されていることから移動可能な蓄電池としても注目されている。この大容量のバッテリーを活用した Vehicle to Grid (V2G) および Vehicle to Home (V2H) が提案されている。これらを実現するためには、双方向バッテリーチャージャが必要である。本学位申請論文では、電力品質保証機能を有する電気自動車用スマートチャージャの新しい制御法を提案し、負荷電流が不平衡で、かつ、高調波電流が含まれている場合のみならず電源電圧に高調波電圧が含まれた場合の電力品質保証効果を明らかにしている。</p> <p>第 1 章および第 2 章では、研究背景および関連する国内外の研究動向について論じている。特に、100 Vrms/ 200 Vrms の家電機器が混在する単相 3 線式配電方式は我が国と台湾で用いられているものであり、欧米諸国の研究者らが提案している電力品質保証機能付き電気自動車用双方向バッテリーチャージャが適用できないことを明らかにし、申請者等が提案している電気自動車用スマートチャージャの有用性について明らかにしている。</p> <p>第 3 章では、電源側の高調波補償特性の改善を目的とした電気自動車用スマートチャージャの電流制御法について検討している。第 2 章で指摘した単相回路において支配的な第 3 次調波を補償可能な第 3 次調波に同期した <math>d</math>-<math>q</math> 座標上の電流フィードバック制御法を提案し、その有効性を明らかにしている。シミュレーション結果および実験結果により、第 3 次調波を補償することで電源電流の THD を大幅に低減可能なことを明らかにしている。</p>	

第 4 章では、無効電力調整機能を有する電気自動車用スマートチャージャの高調波補償法について検討している。電気自動車用スマートチャージャを構成する 3 レグ構成 PWM 整流回路のパワーフローおよび電源電圧、電源電流、負荷電流および補償電流のフェーズ図により、電源側の力率を 0.90 に制御可能でかつ電気自動車用スマートチャージャの変換器の容量を低減可能なことを明らかにしている。シミュレーション結果および実験結果により、電気自動車用スマートチャージャの充電動作時に変換器容量を 26 %低減可能なことを明らかにしている。

IEEE Standard 519-2014 では、電源電圧の THD が最大で 5%、かつ、各高調波次数の基本波成分に対する割合を 3%以下とするように定められている。そこで第 5 章では、この指針を考慮して電源電圧を単相回路で典型的なフラットトップカーブ波形で模擬し、電源電圧および負荷電流が歪んだ場合でも電源側で平衡状態の正弦波で、かつ、力率が 1.00 の電源電流が実現できることを理論的に明らかにしている。シミュレーション結果および実験結果から電源電圧および負荷電流が歪んだ場合における電気自動車用スマートチャージャの制御法の有効性を確認している。

第 6 章では、電源電圧および負荷電流が歪んだ場合における電気自動車用スマートチャージャの無効電力調整法について検討している。電源側の力率を 0.90 に制御することで、電気自動車用スマートチャージャを構成する 3 レグ構成 PWM 整流回路の変換器容量を低減可能なことを明らかにしている。実験結果より、電気自動車用スマートチャージャの充電動作時に第 5 章の実験結果と比較し、変換器容量を 27 %低減可能なことを明らかにしている。

第 7 章では、本学位論文で得られた研究成果の結論を述べるとともに、今後の検討課題について述べている。

#### 【本審査および公聴会における主な質問内容】

本審査および公聴会においては、①電源電流の周波数分析結果は対数表示としない方が第 3 次に着目する理由が伝わりやすいのではないかと、②電源側インピーダンスについてあまり言及されていないが、負荷側インピーダンスとの関係など、スマートチャージャを設置する上でどのようなことに配慮が必要なのか、③基本波と第 3 次調波を同期しないとどのような影響が出るのか、などの質問があった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

以上より、本研究は実用性、創造性、有効性、信頼性ともに優れ、博士(工学)の学位論文に十分値するものと判断した。論文内容および審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格と判定した。

#### 【関連論文の発表状況】

学術論文(査読付き)は 2 編、国際会議論文(査読付き)は 3 編であり、主な論文は以下のとおりである。

- (1) Kei Nishikawa, Fuka Ikeda, Yuki Okamoto, Hiroaki Yamada, Toshihiko Tanaka, and Masayuki Okamoto, "Improvement in Harmonic Compensation of a Smart Charger with a Constant DC-Capacitor Voltage-Control-Based Strategy for Electric Vehicles in Single-Phase Three-Wire Distribution Feeders," MDPI Energies, Vol. 11, No. 6, 14pages, June 2018.
- (2) Kei Nishikawa, Fuka Ikeda, Hiroaki Yamada, Toshihiko Tanaka, and Masayuki Okamoto, "Constant DC-Capacitor Voltage-Control-Based Strategy for Harmonics Compensation in Smart Charger for Electric Vehicles in Single-Phase Three-Wire Distribution Feeders," IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 8, No. 1, pp. 116-123, January 2019.