

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目	単相3線式配電線の電力品質保証機能を付加した電気自動車用スマートチャージャの制御法 (Constant DC-Capacitor Voltage-Control-Based Strategy of Smart Charger for Electric Vehicles With Power-Quality Compensator in Single-Phase Three-Wire Distribution feeders)
氏 名	池田 風花

日本の家庭用低圧配電方式では、柱上変圧器から3本の電線で配電する単相3線式配電方式を採用している。単相3線式配電線に接続された家庭内では、様々な家電製品が用いられており、時々刻々と負荷状態が変化する。このため、家電機器が発生する不平衡電流、無効電流および高調波電流により柱上変圧器の1次側の高圧配電系統電力品質が低下する。2016年1月に定められた中国電力株式会社電気供給約款では、力率による割増・割引電気料金制度が導入されており、電力品質保証は家庭の義務であると考えられる。現在、電気料金を請求するために使用されている積算電力計は、デジタル方式スマートメータへの置き換えが進んでいる。スマートメータを用いることで、電力会社は30分ごとに各家庭の家電機器の使用状況を把握することができる。

申請者が所属している研究グループでは、電気自動車内のバッテリーの充放電動作を行いながら単相3線式配電線の電力品質保証が可能な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きた。上記で指摘したように、スマートメータを用いることで電力会社は30分ごとに各家庭の家電機器の使用状況を把握することができるため、近い将来、各家庭の電力料金を各家庭の家電機器の使用状況に応じて料金を決定できるようになる。提案した電気自動車用スマートチャージャは、単相3線式配電線の電力品質保証が可能なことから、近い将来導入される可能性がある電力料金の割引制度に対応できる点に特長がある。

第1章および第2章では、研究背景および電気自動車のバッテリーチャージャの分類と研究動向についてそれぞれ論じている。先に提案されている3レグ構成PWM整流器を用いたスマートチャージャでは、直流キャパシタ電圧一定制御を用いた電源側の力率を1.00に制御可能な簡易な御法および上記に無効電力演算ブロックを付加したスマートチャージャの変換器容量の低減法について詳細に検討されているが、有効・無効電力演算ブロックを用いない簡易な制御法による変換器容量低減について検討されていない。また、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についても検討されていない。さらに、家庭内負荷に高調波発生源が含まれた場合の高調波電流補償に関しても未検討である。そこで本学位論文では、これらの課題を解決するため電気自動車用スマートチャージャの電力品質保証効果について検討し、その有効性を明らかにしている。

第3章では、有効・無効電力演算ブロックを用いることなく直流キャパシタ電圧一定制御を用いた簡易な電源側の無効電流制御法を提案し、スマートチャージャを構成する3レグ構成PWM整流器の変換器容量の低減効果について検討している。3レグ構成PWM整流器に流出入する電力フローを詳細に検討し、電源側の力率を電気供給約款で許容された0.90に制御しながら電源側で電力品質保証が達成できることを理論的に明らかにしている。さらに、計算機シミュレーションと実験により、直流キャパシタ電圧一定制御にフィードフォワードゲイン K を用いた無効電力調整法を付加することで、電源側の力率を0.90に制御し、スマートチャージャの変換器容量を低減しながら不平衡有効電流および無効電流を補償し力率0.90でバランスした電源電流を実現できることを確認している。

しかしながら、IEEE519-2014 では 6.6 kVrms で供給される配電電圧について各次数の高調波成分を基本波成分の 3%以内で Total Harmonic Distortion (THD)を 5%まで許容している。そこで、電源電圧に高調波電圧が含まれる場合の電力品質保証効果を検討する必要がある、第 4 章では電源電圧に高調波電圧が含まれている場合のスマートチャージャの電力品質保証効果について検討している。スマートチャージャの制御ブロック内では単相 Phase-Locked Loop (PLL)を用いて電源電圧に同期した電気角を検出している。このため、電源電圧が歪んだ場合でも正確に電源電圧の基本波成分に同期した電気角を検出できる。第 3 章と同様に 3 レグ構成 PWM 整流器に流出入する電力フローを詳細に検討し、電源電圧に高調波電圧が含まれた場合でも電源側の力率を電気供給約款で許容された 0.90 に制御しながら電源側で電力品質保証が達成できることを理論的に明らかにしている。さらに、計算機シミュレーションにより、電源側の力率を 0.90 に制御しスマートチャージャの変換器容量を低減しながら不平衡有効電流および無効電流を補償し力率 0.90 でバランスした電源電流を実現できることを確認している。しかしながら、第 3 章および第 4 章では家庭内負荷を RL 線形負荷で模擬しており、提案している電気自動車用スマートチャージャの本格的な実用化のためには、家庭内負荷で発生する高調波電流補償について検討する必要がある。

第 5 章では、家庭内負荷として RL 線形負荷に加えダイオード整流回路を付加し、負荷が発生する不平衡有効電流および無効電流に加え高調波電流の補償について検討している。3 レグ構成 PWM 整流器に流出入する電力フローを詳細に検討し、電源側で力率 1.00 でバランスした正弦波の電源電流を実現できることを明らかにしている。計算機シミュレーションと実験により、電源側で力率 1.00 でバランスした正弦波の電源電流を実現できることを確認している。しかしながら、電源側で力率 1.00 でバランスした正弦波の電源電流を実現することで、スマートチャージャを構成する 3 レグ構成 PWM 整流の変換器容量が増大する問題があった。

第 6 章では、第 3 章で提案した有効・無効電力演算ブロックを不要とした直流キャパシタ電圧一定制御を用いた簡易な電源側の無効電流制御法無効電力調整法によるスマートチャージャの変換器容量低減について検討している。3 レグ構成 PWM 整流器に流出入する電力フローを詳細に検討し、電源側の力率を電気供給約款で許容された 0.90 に制御しながら電源側で電力品質保証が達成できることを理論的に明らかにしている。さらに、計算機シミュレーションと実験により、第 3 章で提案した無効電流調整法を応用することで電源側の力率を 0.90 に制御し、スマートチャージャの変換器容量を低減しながら力率 0.90 でバランスした電源電流を実現できることを確認している。

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、を今後の検討課題について述べている。

(様式 17 号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

(博士後期課程博士用)

山口大学大学院創成科学研究科

報告番号	創科博甲 第 1 号	氏名	池田 風花
最終試験担当者		主 査 田中 俊彦 審査委員 久保 洋 審査委員 山口 真悟 審査委員 若佐 裕治 審査委員 山田 洋明 審査委員 和田 圭二	
【論文題目】 単相 3 線式配電線の電力品質保証機能を付加した電気自動車用スマートチャージャの制御法 (Constant DC-Capacitor Voltage-Control-Based Strategy of Smart Charger for Electric Vehicles With Power-Quality Compensator in Single-Phase Three-Wire Distribution Feeders)			
【論文審査の結果及び最終試験の結果】 平成28年4月から、電気の小売業への参入が全面自由化され、家庭や商店も含む全ての消費者が電力会社や料金メニューを自由に選択できるようになった。この電力小売り自由化によって、消費者は電力供給会社を自由に選べるようになった。各家庭では、これまでの電力量計からスマートメータへの交換が必要となる。家庭用スマートパワーメータが普及することで電力会社は家庭で消費される電力量をデマンド時間で把握可能になるとともに各家庭内の家電機器による電力品質低下状況を把握することが可能となり、電力会社は各家庭によって引き起こされる電力品質低下に応じた電力料金設定を行うことができることとなる。このことは、各家庭が電力品質保証責任を負う時代が到来することを示唆している。このような社会的な背景から、本学位論文では各家庭が電力品質保証責任を果たすため電力品質保証機能を付加した電気自動車用バッテリーチャージャの新しい制御法を提案し、工学的な有用性を明らかにしている。 第1章および第2章では、研究背景および電気自動車のバッテリーチャージャの分類と研究動向についてそれぞれ論じている。これまで提案されている3レグ構成PWM整流器を用いたスマートチャージャでは、直流キャパシタ電圧一定制御を用いた電源側の力率を1.00に制御可能な簡易な制御法および上記に無効電力演算ブロックを付加したスマートチャージャの変換器容量の低減法について詳細に検討されているが、有効・無効電力演算ブロックを用いない簡易な制御法による変換器容量低減について検討されていない。また、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についても検討されていない。本学位論文では、これらの課題を解決するため電気自動車用スマートチャージャの制御法を提案し、その有効性を明らかにすることが目的であることを明確にしている。 第3章では、有効・無効電力演算ブロックを用いることなく直流キャパシタ電圧一定制御を用いた簡易な電源側の無効電流制御法を提案し、スマートチャージャを構成する3レグ構成PWM整流器の変換器容量の低減効果について検討している。3レグ構成PWM整流器に流出入する電力フローを詳細に検討し、電源側の力率を電気供給約款で許容された0.90に制御しながら電源側で電力品質保証が達成できることを理論的に明らかにしている。計算機シミュレーションと実験により、提案した制御法で電源側の力率を0.90に制御しスマートチャージャの変換器容量を低減しながらバランスした電源電流を実現できることを確認している。 しかしながら、IEEE519-2014では6.6 kVrmsで供給される配電線について各次数の高調波成分を基本波成分の3%以内でTotal Harmonic Distortion (THD)を5%まで許容している。そこで、電源電圧に高調波電圧が含まれる場合の電力品質保証効果を検討する必要がある。第4章では電源電圧に高調波電圧が含まれている場合のスマートチャージャの電力品質保証効果について検討している。第			

3章と同様に3レグ構成PWM整流器に流出入する電力フローを詳細に検討し、電源電圧に高調波電圧が含まれた場合でも電源側の力率を電気供給約款で許容された0.90に制御しながら電源側で電力品質保証が達成できることを理論的に明らかにしている。さらに、計算機シミュレーションにより、スマートチャージャの変換器容量を低減しながら不平衡有効電流および無効電流を補償し力率0.90でバランスした電源電流を実現できることを確認している。

第3章および第4章では家庭内負荷をRL線形負荷で模擬しており、提案している電気自動車用スマートチャージャの本格的な実用化のためには、家庭内負荷で発生する高調波電流補償について検討する必要がある。そこで、第5章では、家庭内負荷としてRL線形負荷に加えダイオード整流回路を付加し、負荷が発生する不平衡有効電流および無効電流に加え高調波電流の補償について検討している。3レグ構成PWM整流器に流出入する電力フローを詳細に検討し、電源側で力率1.00でバランスした正弦波の電源電流を実現できることを明らかにしている。計算機シミュレーションと実験により、電源側力率が1.00でバランスした正弦波の電源電流を実現できることを確認している。

第6章では、第3章で提案した有効・無効電力演算ブロックを不要とした直流キャパシタ電圧一定制御を用いた簡易な電源側の無効電流制御法によるスマートチャージャの変換器容量低減について検討している。3レグ構成PWM整流器に流出入する電力フローを詳細に検討し、電源側の力率を電気供給約款で許容された0.90に制御しながら電源側で電力品質保証が達成できることを理論的に明らかにしている。さらに、計算機シミュレーションと実験により、第3章で提案した無効電流調整法を応用することで電源側の力率を0.90に制御し、スマートチャージャの変換器容量を低減しながら電源側力率0.90でバランスした電源電流を実現できることを確認している。

第7章では、本学位論文の結論と今後の検討課題について述べている。

【本審査及び公聴会における主な質問内容】

①直流キャパシタ電圧一定制御というのが複数出てくるが、直流キャパシタ電圧の直流成分を制御するのか瞬時値を制御するのかを明確にする必要がある。②家庭用負荷に対して、バッテリー電流5A_{dc}が適切なのか？また、バッテリー電流の大きさを変更した場合にどうなるのか？③電流量について、負荷条件が変われば変わるのではないのか？今の負荷条件はワーストケースなのかどうか？④バッテリーが満充電となった場合には、スマートチャージャはどのように制御するのか、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確かな回答がなされた。

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。

論文内容及び審査会、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】

関連学術論文(査読付き)は3編、関連国際会議論文(査読付き)は3編、このうち主な論文は以下のとおりである。

- (1) H. Tanaka, F. Ikeda, T. Tanaka, H. Yamada, and M. Okamoto, "Novel reactive power control strategy based on constant dc-capacitor voltage control for reducing the capacity of smart charger for electric vehicles on single-phase three-wire distribution Feeders," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 4, No. 2, pp. 482-488, June 2016.
- (2) F. Ikeda, K. Nishikawa, H. Yamada, T. Tanaka, and M. Okamoto, Constant dc-capacitor voltage-control-based strategy for harmonics compensation of smart charger for electric vehicles in single-phase three-wire distribution feeders with reactive power control, in Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress & Expo., 2016, EC-0859, 7pages.
- (3) F. Ikeda, H. Yamada, T. Tanaka, and M. Okamoto, "Constant dc-capacitor voltage-control-based harmonics compensation strategy of smart charger for electric vehicles in single-phase three-wire distribution feeders," MDPI Energies, Vol. 10, No. 6, 13pages, June 2017.