

令和元年6月19日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06225

研究課題名(和文) 電力品質保証機能付き電気自動車用チャージャの簡易な制御法とSiC化による効率改善

研究課題名(英文) A Simplified Control Strategy for Bidirectional Charger for Electric Vehicle with Power Quality Compensator and Improved Power Conversion Efficiency by SiC-MOSFETs

研究代表者

田中 俊彦 (Tanaka, Toshihiko)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：00179772

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：現代の家電機器は、ダイオード整流回路が内蔵されている。このため、単相三線式配電線から受電している家庭内では、不平衡状態で、かつ、高調波電流を含んだ状態となっている。本研究では、電気自動車用スマートチャージャを構成する単相3レグPWM整流回路の直流電圧一定制御ブロックのみを用いた制御法を用いて電源側で不平衡電流成分ならびに無効電流成分と高調波電流成分を補償し、正弦波状態でバランスした電源側電流を実現できることを理論的に明らかにし、計算機シミュレーションと実験により確認した。さらに、主回路の半導体デバイスをSiC-MOSFETs化することで効率を向上できることを実験的に確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

単相三線式配電線が普及している国や地域は少なく、単相三線式配電線の電力品質保証についての検討例は世界的にも非常に少ない。このため、電気自動車用双方向バッテリーチャージャに電力品質保証機能を付加し、単相三線式配電線の電力品質向上について検討したことに学術的な意義がある。さらに、電力品質保証のための制御法として、瞬時有効・無効電流と高調波電流の演算ブロックを省略し、3レグ方式PWM整流回路の直流キャパシタ電圧一定制御ブロックだけを用いて電力品質保証を達成した点も学術的な意義が認められる。これにより、柱上変圧器の効率を改善し国レベルでの電力損失低減に貢献できることが社会的意義であると考えられる。

研究成果の概要(英文)： Diode rectifiers are typically included in modern consumer electronics. The load currents of domestic consumer in single-phase three-wire distribution feeders are unbalanced and distorted. It is theoretically shown that the constant dc-capacitor voltage-control (CDCVC)-based strategy for the three-leg PWM rectifier, which performs as smart charger (SC), can compensate unbalanced active, reactive and harmonic components on the source side in the domestic consumer. The validity and high practicability of the CDCVC-based strategy is confirmed by digital computer simulation using PSIM software. A reduced-scale experimental model is constructed and tested. Experimental results demonstrate that balanced and sinusoidal source-side currents in the domestic consumer are achieved with the CDCVC-based strategy for the three-leg PWM rectifier. It is shown experimentally that the conversion efficiency of the three-leg PWM rectifier with SiC-MOSFETs is improved.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：電気自動車用双方バッテリーチャージャ 単相三線式配電 高調波補償 家電機器 3レグ構成PWM整流器
直流キャパシタ電圧一定制御

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現代の家電機器は、ダイオード整流回路が内蔵されている。このため、単相三線式配電線から受電している家庭内では、不平衡状態で、かつ、高調波電流を含んだ状態となっている。不平衡状態で、かつ、高調波電流を含んだ状態では、柱上変圧器内の損失が増加することが知られており、単相三線式配電線の電力品質保証が望まれていた。一方、電気自動車が普及期を迎え各家庭に電気自動車のバッテリーを充放電する双方向バッテリーチャージャの普及されることが予想される。そこで、電気自動車用双方向バッテリーチャージャに電力品質保証機能を付加し単相三線式配電線電力品質保証を実現する。次に、次世代電力用半導体素子として期待されている SiC-MOSFETs が商用ベースとなったことから、電気自動車用双方向バッテリーチャージャを SiC-MOSFETs し電力変換効率を向上させることが第 2 番目の検討課題であった。

さらに、家庭用 PV 発電装置では昼間に接続点における電圧が上昇し売電制限が発生する問題がある。そこで、無効電力調整機能を電気自動車用双方向バッテリーチャージャに付加することで、この問題を解決できるものと考えた。

2. 研究の目的

- (1) 家庭用単相三線式配電において、著者らが先に提案した無効電力および不平衡有効電力補償機能を有する 3 レグ構成 PWM 整流回路と双方向チョップ回路から構成される電気自動車用スマートチャージャに直流キャパシタ電圧一定制御だけを用いた高調波補償機能を付加し、その有効性と実用性をシミュレーションと実験により検証する。
- (2) 次世代電力用半導体素子として期待されている SiC-MOSFETs を電気自動車用スマートチャージャに用いることで、電力変化効率を向上する。
- (3) 直流キャパシタ電圧一定制御だけを用いた高調波補償機能に無効電力調整を付加し、同じ接続点で連系する家庭用 PV 発電装置の昼間における運転制限を克服する。

3. 研究の方法

- (1) 単相三線式配電線に接続されている家庭内負荷に現代の家電機器に内蔵されているダイオード整流回路を考慮し家庭内の電流がひずみ波となっている状態で、単相 3 レグ PWM 整流回路の直流電圧一定制御ブロックのみを用いた制御法で不平衡電流成分ならびに無効電流成分と高調波電流成分を補償し正弦波状態でバランスした力率が 1.0 の電流を実現できることを理論的に明らかにする。さらに、計算機シミュレーションと実験により有効性を確認する。
- (2) スマートチャージャを構成する PWM 整流回路と双方向 DC-DC コンバータ SiC MOSFETs 化し、電力変換効率が改善できることを実験的に明らかにする。
- (3) 上記 (1) で検討した制御法に無効電力調整機能を付加し、指令値どおりの力率となり正弦波状態でバランスした電源電流が実現できることを理論的に明らかにし、計算機シミュレーションと実験により有効性を確認する。
- (4) 上記 (3) により受電端電圧の上昇が抑制でき同じ接続点で連系する家庭用 PV 発電装置の昼間における運転制限を克服でき、経済的効果を試算する。

4. 研究成果

図 1 に、本研究で検討してきた電気自動車用双方向バッテリーチャージャの主回路構成図と制御ブロック図を示す。RL 線形負荷と並列にダイオード整流回路が接続されている。これらは、一般的な家庭内負荷を模擬している。ここで、ダイオード整流回路はエアコンや IH 調理器などの現代家電を模擬している。電気自動車用スマートチャージャ内の単相 3 レグ PWM 整流回路は電力品質保証機能を有しているが、瞬時有効・無効電流および高調波電流の演算ブロックを省略した直流電圧一定制御ブロックのみを用いた制御法としている。

平成 28 年度では、単相 3 レグ PWM 整流回路に流入する電力フローを詳細に

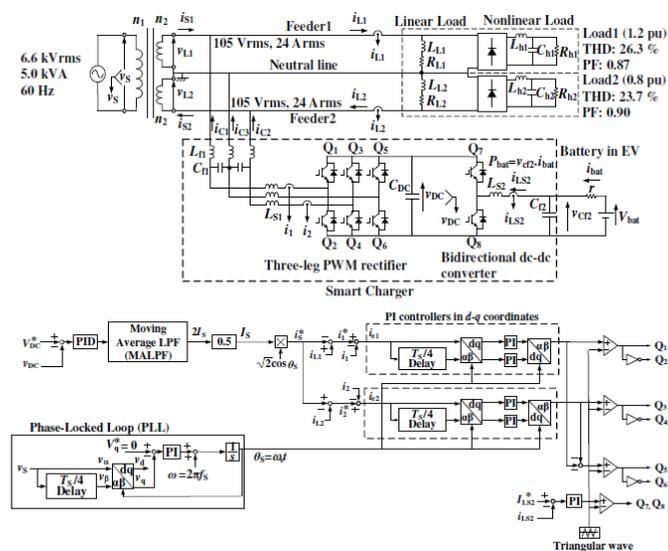


図 1 電気自動車用双方向バッテリーチャージャの主回路構成図と制御ブロック図

検討し、電源側で不平衡電流成分ならびに無効電流成分と高調波電流成分を補償し、正弦波状態でバランスした力率が 1.0 の電流を実現できることを理論的に明らかにした。次に、直流電圧一定制御ブロックのみを用いた制御法の有効性を確認するため計算機シミュレーションを行った。シミュレーション結果から、家庭内の電流がアンバランスで高調波を含んでいるが提案しているスマートチャージャの制御法により正弦波平衡状態で力率が 1.0 の電源電流を実現できることを明らかにした。図 1 の主回路モデルを大学の研究室内で構築することは困難であり、線間電圧 200 Vrms の三相電源から単相変圧器を介して 100 Vrms の単相三線式配電線の縮小モデルを構築した。図 2 に、構築した縮小モデルの構成図を示す。提案している直流電圧一定制御ブロックのみを用いた制御法とは、Digital Signal Processor (DSP) によりソフトウェアで実現している。バッテリー充電時には、双方向 DC-DC コンバータの負荷を抵抗として電気自動車内のバッテリーを模擬している。また、放電時は電流制御形直流電源で、電気自動車内のバッテリーを模擬している。図 3 に、バッテリー充電時の実験結果を示す。家庭内では、各フィード電流 i_{L1} および i_{L2} は家電機器が発生する高調波電流により歪んだ波形となっており、さらに、振幅が異なった不平衡状態となっている。一方、双方向バッテリーチャージャの 3 レグ PWM 整流回路により、不平衡有効電流、無効電流および高調波電流が補償され電源電流 i_{S1} および i_{S2} は正弦波・平衡状態となり、かつ、力率が 1.0 となっている。双方 DC-DC コンバータの出力電流 i_{LS2} は、放電時を正の向きとしているため、-5 Adc に制御されている。実験結果より、平成 28 年度に予定していた研究成果を得ることができた。

平成 29 年度では、EV 用チャージャの主回路の SiC-MOSFETs 化に関して実験により定量的な検討を行った。IGBTs を用いた 3 レグ構成 PWM インバータと SiC-MOSFETs を用いた 3 レグ構成 PWM インバータについて、直流電圧を 270 Vdc とし各レグの出力電流を 14.4 Arms とした場合の効率を評価した。IGBTs を用いた 3 レグ構成 PWM インバータの変換効率は 96.8 % であったのに対し、SiC-MOSFETs を用いた 3 レグ構成 PWM インバータでは 98.5 % の変換効率となった。したがって、EV 用チャージャの主回路を SiC-MOSFETs 化することで、1.7 % の効率向上が達成できることを確認した。EV 用チャージャによる電力品質保証による柱上変圧器の効率改善効果と EV 用チャージャを構成

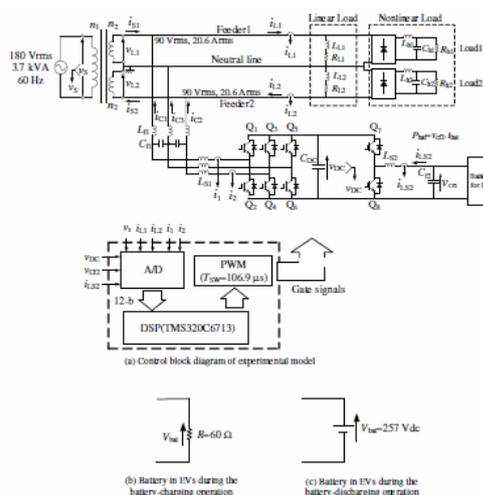


図 2 構築した縮小実験モデル

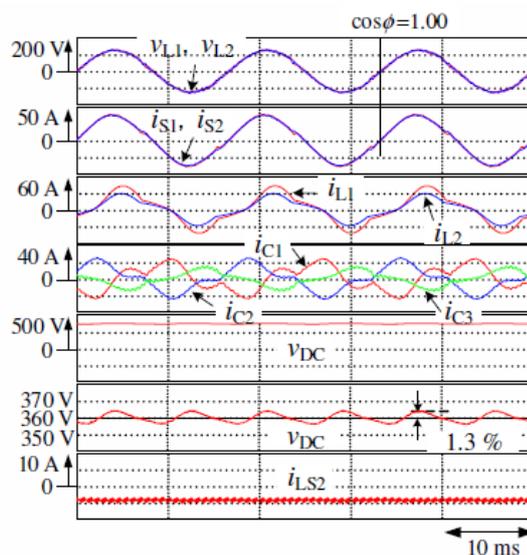


図 3 バッテリー充電時の実験結果

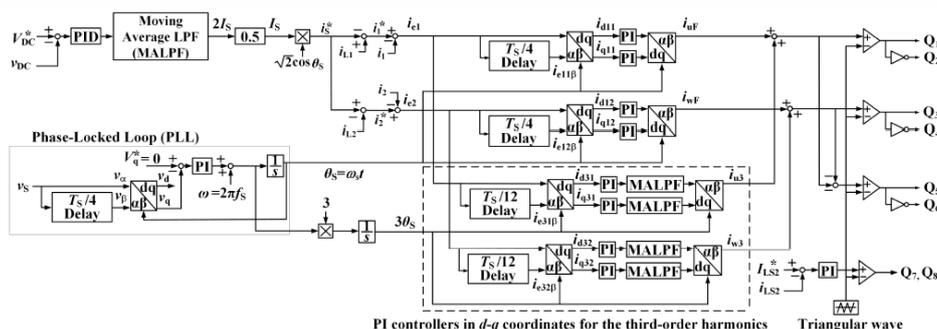


図 4 第 3 次高調波電流フィードバックを付加した制御回路

する3レグ構成PWM整流回路の損失を総合的に考慮した効率については、引き続き検討する予定である。また、単相回路における固有の問題として補償後の電源電流に第3次高調波電流が残存し、電源電流 i_{s1} および i_{s2} の Total harmonic Distortion (THD) を悪化させる問題点がある。これを解決するために図1の3レグPWM整流回路の制御ブロックに第3次高調波電流のフェードバックループを付加し、この問題を解決した。図4に、この場合の制御ブロック図を示す。図1の制御回路ブロックと比較し、第3次調波電流フィードバックブロックが追加されている。ただし、主回路部分は図1と全く同じである。第3次調波電流フィードバックブロックを付加した制御法の有効性を図2に示した縮小実験モデルを用いて確認した。図5に、図4の制御ブロックを用いた場合のバッテリー充電時の実験結果を示す。図3の実験結果の電源電流 i_{s1} および i_{s2} と比較して図5の電源電流 i_{s1} および i_{s2} は、より正弦波形状となっている。このとき、電源電流のTHDは3%程度改善することができている。

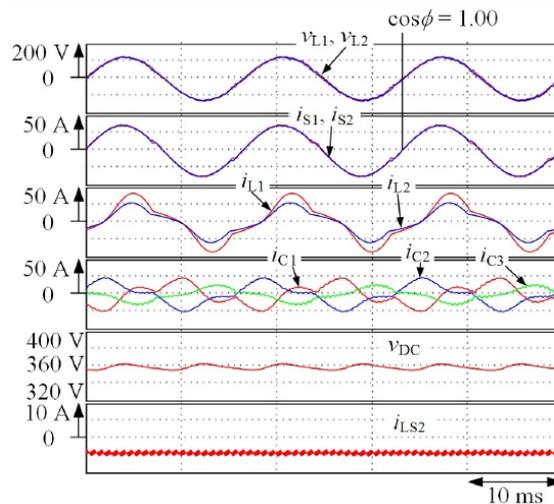


図5 図4の制御回路を用いた場合のバッテリー充電時の実験結果

このとき、電源電流のTHDは3%程度改善することができている。

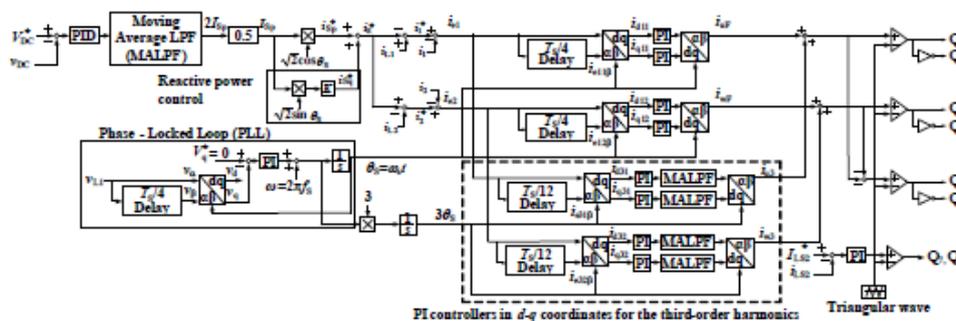


図6 無効電力調整機能を付加した制御ブロック図

IEEE Standard 519-2014では配電電圧の範囲が1kVから69kVではTHDが5%以下で、かつ、各次数の高調波電圧の実効値は基本波の実効値の3%以下と定められている。そこで、平成30年度では電源電圧歪を考慮し、研究グループが先に提案している有効・無効電流演算ブロックを省略し直流キャパシタ電圧一定制御だけを用いた基本波無効電流制御法無効電流調整機能の有効性を検討した。図6に、無効電力調整機能を付加した制御回路を示す。図1と比較すると、直流キャパシタ電圧一定制御ブロックの出力部分にゲイン K を乗算し有効電流分と直行した無効電流を演算している部分が付加されている。このとき、3レグ構成PWM整流回路のパワーローを詳細に検討し、電源電圧と電源電流の両者が歪んでいる場合でも、直流キャパシタ電圧一定制御だけを用いた制御法により、電源側の基本波無効電流を調整しながら電源側で平衡状態の正弦波電流を実現できることを理論的に明らかにし、計算機シミュレーションと実験により確認した。図7に、実験結果を示

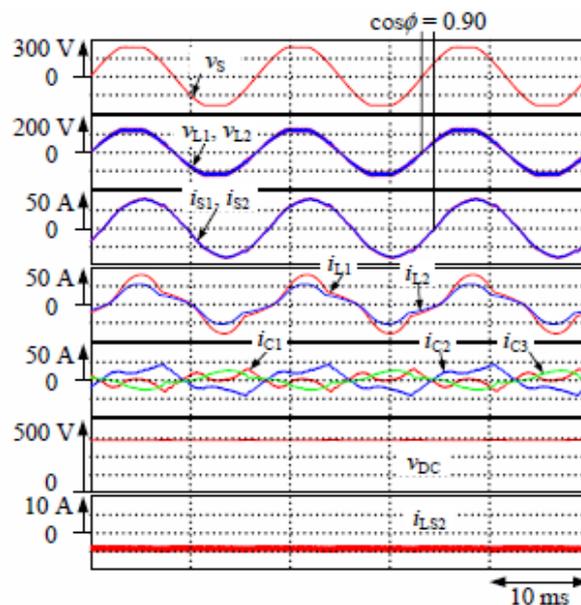


図7 図6の制御回路を用いた場合のバッテリー充電時の実験結果

す。図3および図5と比較し、電源電圧が歪んでいる。さらに、電源電圧と電源電流の位相が異なり、力率が指令値である0.9に制御されている。計算機シミュレーション結果と実験結果から、電源電圧歪を考慮した場合でも、変換器容量を30%程度低減できることを明らかにした。電気供給約款では、単相配電方式では101 Vrmsを基準として95 Vrmsから107 Vrmsの範囲となるように定められている。EV内のバッテリーの放電モードでは受電端電圧が上昇するが基本波無効電流調整により、電圧上昇を抑制できることを確認した。これにより、放電抑制を回避できる。しかしながら、売電制限抑制効果の経済的検討については完了することができず引き続き検討する予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

- (1) F. Ikeda, T. Tanaka, H. Yamada, and M. Okamoto, "Constant DC-capacitor voltage-control-based harmonics compensation algorithm of smart charger for electric vehicles in single-phase three-wire distribution feeders," *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 5, No. 5, 2016, pp. 405-406 (査読有)
DOI: 10.1541/ieejia.5.405
- (2) M. Ushiroda, T. Wakimoto, H. Yamada, T. Tanaka, M. Okamoto, and K. Kawahara, "Voltage rise suppression and load balancing by PV-PCS with constant DC-capacitor voltage-control-based strategy in single-phase three-wire distribution feeders," *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 6, No. 5, 2017, pp. 303-310 (査読有)
DOI: 10.1541/ieejia.6.303
- (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, 2017, 797 (13pages) (査読有)
DOI: 10.3390/en10060797
- (4) K. Nshikawa, F. Ikeda, H. Yamada, T. Tanaka, and M. 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, 2018, 1604 (14pages) (査読有)
DOI: 10.3390/en11061604
- (5) F. Ikeda, T. Tanaka, H. Yamada, and M. Okamoto, "Simple harmonics compensation method for smart charger with constant DC-capacitor voltage-control for electric vehicles in single-phase three-wire distribution feeders," *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 8, No. 1, 2019, pp. 23-32 (査読有)
DOI: 10.1541/ieejia.8.23
- (6) K. Nshikawa, F. Ikeda, H. Yamada, T. Tanaka, and M. Okamoto, "Constant DC-capacitor voltage-control-based strategy for harmonics compensation in smart charger for electric vehicles in single-phase three-wire distribution feeders with reactive power control," *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 8, No. 1, 2019, pp. 116-123 (査読有)
DOI: 10.1541/ieejia.8.116

[学会発表] (計8件)

- (1) F. Ikeda, K. Nshikawa, 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," *The IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2016, No. 7854956 (7pages) (査読有)
DOI: 10.1109/ECCE.2016.7854956
- (2) F. Ikeda, H. Yamada, T. Tanaka, and M. Okamoto, "Constant dc-capacitor voltage-control-based strategy of smart charger for electric vehicles in single-phase three-wire distribution feeders with under multiple household customers," *The 18th IEEE Hiroshima Section Student Symposium*, 2016, pp. 21-24
- (3) K. Nshikawa, F. Ikeda, H. Yamada, T. Tanaka, and M. Okamoto, "Improvement of harmonics compensation performance of smart charger with constant DC-capacitor voltage control for electric vehicles in single-phase three-wire distribution feeders," *The IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC)*, 2016, No. 7846180 (6pages) (査読有)
DOI: 10.1109/SPEC.2016.7846180
- (4) F. Ikeda, K. Nshikawa, H. Yamada, T. Tanaka, and M. Okamoto, "Compensation performance of smart charger with constant dc-capacitor voltage-control-based strategy for electric vehicles in single-phase three-wire distribution feeders under distorted source voltage conditions," *The IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia*, 2017, pp. 828-833 (査読有)
DOI: 10.1109/IFEEC.2017.7992147
- (5) 池田風花, 西川慧, 山田洋明, 田中俊彦, 岡本昌幸: 「電源電圧および負荷電流が歪んだ場

合の電気自動車用スマートチャージャの高調波補償法」, 平成 29 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2017, R17-04-04 (電気学会論文発表賞)

- (6) F. Ikeda, K. Nshikawa, Y. Okamoto, H. Yamada, T. Tanaka, and M. Okamoto, "Harmonics compensation with constant dc-capacitor voltage-control-based strategy of smart charger for electric vehicles in single-phase three-wire distribution feeders under distorted source voltage and load currents conditions," The IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2017, pp. 2975-2982 (査読有)
DOI: 10.1109/ECCE.2017.8096547
- (7) Y. Okamoto F. Ikeda, K. Nshikawa, H. Yamada, T. Tanaka, and M. Okamoto, "Reducing capacitances of DC capacitors in smart charger for electric vehicles in single-phase three-wire distribution feeders with sinusoidal charging and discharging for Li-ion batteries," The IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), 2017, pp. 1-2 (査読有)
DOI: 10.1109/GCCE.2017.8229430
- (8) K. Nishikawa, F. Ikeda, H. Yamada, T. Tanaka, and M. Okamoto, "Reducing the Calculation Time of DC-Capacitor Voltage-Control-Based Strategy in Smart Charger for Electric Vehicles in Single-Phase Three-Wire Distribution Feeders," The 19th IEEE Hiroshima Section Student Symposium, 2017, A1-2 (最優秀研究賞)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

<http://pelab.eee.yamaguchi-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：山田洋明

ローマ字氏名：Hiroaki Yamada

所属研究機関名：山口大学

部局名：創成科学研究科

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：00455099

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：池田風花

ローマ字氏名：Fuka Ikeda

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。