

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	単相 3 線式配電線における電力品質保証機能を有する HEMS の制御法 (Control Strategies of Home Energy Management System with Power Quality Compensator in Single-Phase Three-Wire Distribution Feeders)
氏 名 (Name)	江本 嶺鷹
近年、カーボンニュートラル社会の実現に向けて再生可能エネルギーの導入が急速に進み、電力系統は従来の大規模集中型から地域単位の分散協調型へと変化している。しかし、変動性の高い再生可能電源の増加は、系統周波数や電圧の安定性を損なう要因となり、需給バランスの維持と電力品質の確保が課題である。日本では、住宅用太陽光発電や電気自動車（Electric Vehicle: EV）の普及により、低圧配電系統にも多数の分散型電源が導入されている。特に EV は大容量蓄電池を備え、双方向電力変換を可能とするバッテリーチャージャを通じて、系統安定化やエネルギーの自家消費促進に寄与できる点で注目されている。一方で、日本の主な低圧配電方式である単相 3 線式配電方式では、各相に接続される負荷が均等でない場合、中性線電流が生じる。また、家庭内で使用されるインバータ機器などの非線形負荷により、高調波電流が配電系統に流出することもある。これらは、柱上変圧器や配線の過熱および損失の増加、電圧不平衡を引き起こす要因となる。これらの問題を改善するために、アクティブフィルタやパワーラインコンディショナによる補償技術が提案されているが、家庭単位での導入はコストや設置スペースの観点から現実的でない。そこで、パワーコンディショナ（Power Conditioning System: PCS）や EV チャージャに電力品質補償機能を付加し、アクティブフィルタとして活用することが有効な手段と考えられる。さらに、瞬時電圧低下時にも連系を維持する Fault Ride Through (FRT) 機能の付与が求められており、電力品質保証と FRT 機能を統合した多機能 PCS およびチャージャの研究が重要な課題となっている。 本論文は、7 章構成としている。 第 1 章では、本研究の背景、目的および全体構成を示した。 第 2 章では、再生可能エネルギーの世界的な導入拡大の変遷と、それに伴う電力システム構成の変化を概説し、単相 3 線式配電における電力品質問題を整理した。また、電力品質保証機能を実現するためのアクティブフィルタ機能を有する PCS およびバッテリーチャージャに関する先行研究を整理し、さらに、電圧低下時における連系維持を目的とした FRT 機能に関する研究動向についても整理した。 第 3 章では、電力品質保証機能を有する EV 用双方向バッテリーチャージャに対し、家庭内負荷の消費電力に応じて放電電力を動的に制御し、系統への逆潮流を防止する放電電力制御法を提案した。提案法の基本原理を理論的に示し、シミュレーションおよび実験により、提案した制御法が家庭内負荷の消費電力に応じてバッテリー放電電力を動的に調整し、電源電流をほぼ零に抑制できることを確認した。また、負荷変動時においても、家庭内負荷の消費電力に応じてバッテリー放電電力を動的に調整し、電源電流をほぼ零に抑制できることを確認した。 第 4 章では、電力品質保証機能を有する EV 用双方向バッテリーチャージャの実用化に向け、EV 未接続・充電・放電の各動作を、電力品質保証動作を維持したままシームレスに切り替える制御法を提案した。直流キャパシタ電圧一定制御に基づく制御法を用いることで、バッテリーの電力が正（放電）・負（充電）・零（未接続）のいずれの場合においても、力率 1.00 の平衡した正弦波電源電流を連続的に実現できることを理論的に示している。シミュレーションおよび実験により、各動作の切り替え時においても直流キャパシタ電圧が一定に保持され、電源側で電力品質が一貫して保証されることを確認した。 第 5 章では、単相 3 線式配電系統における電力品質の向上および小型化を目的として、中性点クランプ式	

様式 7 号（第 12 条，第 31 条関係）

（様式 7 号）（Format No.7）日本語版

(Neutral-point-clamped :NPC)インバータを用いた Home energy management system (HEMS) の電力品質保証制御法を検討した。まず，提案システムの主回路構成および制御アルゴリズムを示し，負荷電流の不均衡成分，無効成分，高調波成分を同時に補償する制御法を理論的に導出している。本制御法では，負荷電流および補償電流のフィードバック演算を d - q 軸座標上で行うことにより，シンプルな制御構成で高調波および不平衡電流の補償を実現している。シミュレーションを通じて，提案する HEMS が電源電流の無効成分，高調波成分および不平衡成分を有効に抑制し，フィルタ素子の小型化も実現できることを確認している。また，負荷変動時やキャパシタ容量のばらつきを考慮した場合においても，電源電流の品質補償が維持され，直流リンク電圧およびキャパシタ電圧の安定が維持されることを明らかにした。

第 6 章では，単相 NPC インバータ，Input-parallel output-series (IPOS) Dual active bridge (DAB) コンバータおよびバッテリーを組み合わせた PCS を対象に，日本の系統連系要件である FRT 要件に対応した出力電力制御法を提案している。提案する制御法は，電圧ディップ時の残電圧レベルに応じて出力電力指令値を段階的かつ連続的に変化させることで，インバータ素子の定格電流を超過することなく電力供給を継続できる点に特徴を有している。これにより，電圧低下時における過電流や素子破損を防止しつつ，FRT 要件で規定される出力電力の 100ms および 200ms 以内の回復を確実に達成する制御を実現している。シミュレーション結果から，IPOS 構成が従来構成の DAB コンバータと比較して約 1.4% 高い効率を達成し，インターリーブ駆動によってバッテリー側の電流リップルの高周波化を実現し，パッシブフィルタの小型化が可能であることを示している。また，電圧ディップ時の過電流防止および出力電力の高速回復動作により，日本の FRT 要件を十分な余裕をもって満足することを確認した。

第 7 章では，本論文で得られた研究成果について述べている。

（和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度）
（about 800 words）

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	単相 3 線式配電線における電力品質保証機能を有する HEMS の制御法 (Control Strategies of Home Energy Management System with Power Quality Compensator in Single-Phase Three-Wire Distribution Feeders)
氏 名 (Name)	EMOTO Reo
In recent years, the rapid deployment of renewable energy sources aimed at achieving a carbon-neutral society has transformed power systems from conventional large-scale centralized structures into regionally distributed and coordinated networks. However, the increasing penetration of variable renewable energy sources has introduced challenges such as voltage and frequency instability, making demand-supply balancing and power quality assurance critical issues. In Japan, the widespread installation of residential photovoltaic (PV) systems and electric vehicles (EVs) has significantly increased the number of distributed energy resources connected to low-voltage distribution feeders. EVs, in particular, equipped with large-capacity batteries and capable of bidirectional power transfer through battery chargers, offer strong potential for grid stabilization and enhancement of self-consumption. On the other hand, Japan's predominant low-voltage distribution configuration—the single-phase three-wire system—suffers from neutral-line currents caused by load imbalance and harmonic currents generated by nonlinear household appliances such as inverters. These issues can lead to overheating and increased losses in pole-mounted transformers and distribution cables, as well as voltage imbalance. Although compensation technologies such as active filters and power-line conditioners have been proposed, household-level installation remains impractical due to cost and space constraints. Therefore, integrating power quality compensation functions into power conditioning systems (PCSs) and EV chargers, enabling them to operate as active filters, represents a promising solution. Furthermore, PCSs are required to provide fault ride-through (FRT) capability during voltage dips, making the development of multifunctional PCSs and chargers capable of both power quality compensation and FRT a pressing research objective. This dissertation consists of seven chapters. Chapter 1 outlines the background, objectives, and overall structure of the research. Chapter 2 reviews global trends in renewable energy deployment, the resulting evolution of power system configurations, and the power quality issues inherent in single-phase three-wire distribution systems. Previous studies on PCSs and battery chargers with active power quality compensation functions are summarized, along with research developments related to FRT capabilities during voltage dips. Chapter 3 proposes a discharging power control method for an EV bidirectional battery charger with integrated power quality compensation. The proposed method dynamically adjusts the battery discharge power according to household load demand to prevent reverse power flow to the grid. Theoretical analysis, simulations, and experiments demonstrate that the charger can regulate discharge power in response to load variations and suppress the grid current to nearly zero. Chapter 4 presents a seamless mode-transition method for practical implementation of EV bidirectional battery	

様式 7 号 (第 12 条, 第 31 条関係)

(様式 7 号) (Format No.7) 英語版

chargers with power quality compensation capability. By employing a DC-capacitor-voltage-regulation-based control strategy, the charger maintains a continuous sinusoidal grid current with unity power factor regardless of whether the battery is discharging, charging, or disconnected. Simulations and experiments confirm stable DC-capacitor voltage regulation and consistent power quality during mode transitions.

Chapter 5 investigates a power quality compensation strategy for a home energy management system (HEMS) using a neutral-point-clamped (NPC) inverter. The proposed control method compensates for unbalanced, reactive, and harmonic components of the load current using a dq-axis feedback algorithm, enabling simplified implementation and reduced passive filter size. Simulation results verify effective suppression of unwanted current components and stable operation under load variations and capacitor mismatches.

Chapter 6 proposes an output power control strategy that satisfies Japan's FRT requirements for a PCS integrating a single-phase NPC inverter, an input-parallel output-series (IPOS) dual-active-bridge (DAB) converter, and a battery. The control strategy adjusts the output power reference in a stepwise and continuous manner based on the retained grid voltage during voltage dips, thereby preventing overcurrent and device failure. Simulation results show that the IPOS configuration achieves approximately 1.4% higher efficiency than a conventional DAB converter, and that interleaved operation shifts the battery-side current ripple to higher frequencies, enabling downsizing of passive filters. The proposed method ensures overcurrent prevention and rapid post-fault power recovery, fully satisfying Japan's FRT requirements with sufficient margin.

Chapter 7 summarizes the key findings and contributions of this dissertation.

(和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度)
(about 800 words)

(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	江本 嶺鷹
審 査 委 員	主 査：山田 洋明
	副 査：田村 慶信
	副 査：村田 英一
	副 査：三島 智和
	副 査：森田 実
論 文 題 目	単相 3 線式配電線における電力品質保証機能を有する HEMS の制御法 (Control Strategies of Home Energy Management System 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】 本研究では、日本の低圧配電において利用されている単相 3 線式配電に接続される電気自動車用バッテリーチャージャを含む Home Energy Management System (HEMS)における電力品質保証および経済性を考慮したシームレスな充放電制御法、系統電圧低下および復帰時の Fault Ride Through (FRT)要件を満足する制御法を提案し、その有効性を明らかにしている。 はじめに、単相 2 レベル Pulse Width Modulated (PWM) 整流回路と非絶縁型 DC/DC コンバータから構成される電気自動車用バッテリーチャージャを含む HEMS において、需要家側の負荷電力に応じてバッテリー放電電力を決定する放電電力制御法を提案した。これにより、電気自動車用バッテリーチャージャを含む HEMS の設置者の経済性を考慮した放電動作の実現が可能となる。また、電力変換器の損失を考慮した電力補正により、受電側の電源電流をほぼ 0A とすることができることを計算機シミュレーションおよび実験により確認し、電気自動車のバッテリーからの Vehicle to Home(V2H) を実現できることを明らかにした。 次に、電気自動車未接続時、バッテリー放電時、バッテリー充電時の動作を配電線の電力品質保証制御を行いながらシームレスに切り替える制御法を提案した。単相 2 レベル PWM 整流回路と非絶縁型 DC/DC コンバータの間に接続された直流キャパシタ電圧の平均値を一定に制御する直流キャパシタ電圧一定制御に基づき、バッテリーの接続や充放電状態に関わらず電力品質保証を維持できる。計算機シミュレーションおよび実験により、シームレスな運転切替を実現できることを明らかにした。 最後に、電力品質保証効果の改善およびシステムの小型化を図ることを目的として、Neutral-Point-Clamped (NPC) PWM 整流回路と Input Parallel Output Series (IPOS) 型 Dual Active Bridge (DAB) コンバータにより構成した HEMS を提案した。実用化を視野に入れ、配電線の電圧低下時における動作要件 Fault-Ride-Through (FRT) 要件を満たす	

(様式 9 号)

ことのできる HEMS の制御法を提案した。FRT 要件で規定されている出力電力の 100ms あるいは 200ms 以内の回復が実現できることを計算機シミュレーションにより明らかにした。

公聴会における主な質問事項は、バッテリー充電方式に関するもの、電力品質保証の基準に関するもの、NPC インバータ方式の利点に関するもの、スマートチャージャ設置の利点に関するものなどであった。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、本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の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、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。（関連論文 計 4 編）

1. Reo Emoto, Shun Okamoto, Fuka Ikeda, Masayuki Okamoto, Hiroaki Yamada, Toshihiko Tanaka, "Control Strategy of Discharged Power with Bidirectional Battery Charger for EVs to Prevent Reverse Power Flow to Utility Grid," IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 13, No. 3, pp. 346-347, 2024
2. Reo Emoto, Hiroaki Yamada, and Tomokazu Mishima, "A Model of Output Power Control Method for Fault Ride-Through in a Single-Phase NPC Inverter-Based Power Conditioning System with IPOS DAB Converter and Battery," Electronics, Vol. 14, No. 21, 18pages, 4291, 2025