

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	不平衡負荷を有する三相 4 線式配電線におけるアクティブパワーラインコンディショナの電力品質保証 (Power Quality Compensation of Active Power-Line Conditioner in Three-Phase Four-Wire Distribution Feeder with Unbalanced Loads)
氏 名 (Name)	佐飛 優花
<p>近年，電気製品の多様化や IT の進歩，IT 機器の利活用の増加により，高品質な電気エネルギーの安定的な供給が以前にもまして重要となっている。電力は，発電所で発電され，送電線，変電所などを経由し，配電線によって需要家に供給される。三相 4 線式配電は，EU 加盟国を中心としたヨーロッパ諸国や中国や韓国，タイなどのアジア諸国において幅広く用いられている配電方式である。三相 4 線式配電は，単一の配電設備から，三相負荷と単相負荷に同時に給電できるため，日本やアメリカ，カナダなどの北米諸国で用いられている三相 3 線式配電と単相 3 線式配電の併用と比較して，設備コストの大幅な低減が可能である。</p> <p>しかしながら，三相 4 線式配電線に，不特定多数の単相負荷が接続されることにより相電流に不平衡が生じ，中性線に電流が流入する。これにより，変圧器の発熱が生じ，電力損失が増大することが懸念される。また，近年では，ダイオード整流器を含む家電機器が普及したことにより，電力変換に伴って生じる高調波電流が問題となっている。高調波電流が周辺の電力設備や機器に流入することで，誤動作や過熱，異音等の不具合が生じ，最悪の場合にはシステムの停止や焼損，破壊を招く恐れがある。したがって，高調波対策は必要不可欠である。</p> <p>本論文は，8 章構成としている。</p> <p>第 1 章では，電力品質保証の重要性について述べる。第 2 章では，三相 4 線式配電の構成や特徴，高調波による機器への影響について述べ，電力品質保証装置であるアクティブパワーラインコンディショナ(Active Power-Line Conditioner: APLC)の制御法の研究動向について述べる。</p> <p>第 3 章では，非線形負荷が系統に不平衡に接続され，高調波電流が発生した場合における直流キャパシタ電圧一定制御を用いた三相 4 線式 APLC の制御法により，電源側において平衡かつ受電端電圧と同位相な正弦波の電流波形が実現可能であることを，瞬時電力フローを用いた理論検討によって明らかにした。また，計算機シミュレーションおよび実機検証によって，提案する制御法の有効性および実用性を明らかにした。さらに，直流キャパシタ電圧一定制御ブロックの出力信号が負荷電流の基本波有効電流成分と一致することを実験により確認した。</p> <p>第 4 章では，直流キャパシタ電圧一定制御を用いた三相 4 線式配電用 APLC の各相別基本波力率(Displacement Power Factor: DPF)制御法について検討を行っている。提案する各相別 DPF 制御法によって，中性線電流を抑制しながら，電源側で不平衡かつ任意の力率となるような無効電流を含む正弦波の電流が実現可能であることを瞬時電力フローを用いた理論検討によって明らかにした。また，計算機シミュレーションおよび実機検証によって提案する制御法の有効性および実用性を明らかにした。</p> <p>第 5 章では，三相 4 線式配電用 APLC の各相別無効電流制御法について検討を行う。電源側において無効電流を注入し，不平衡な正弦波の電源電流を実現できる電源電流指令値の基本原理を説明する。算出された電源電流指令値を用いて無効電力制御を行うと，電源側の電流は正弦波となるが，中性線電</p>	

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

流は増大する。この問題を解決するため，電源側の有効成分を再分配した。提案する制御法によって，中性線電流を抑制しながら，電源側で不平衡かつ任意の無効電流を含む正弦波の電流が実現可能であることを瞬時電力フローを用いた理論検討によって明らかにした。次に，各相別無効電流制御法の基本原理をシミュレーションおよび実験にて検討し，その有効性を明らかにしている。最後に，受電端電圧および送電端電圧が不平衡な状態において，受電端電圧補償による三相平衡な電源電流を実現し，中性線電流の抑制を達成できることをシミュレーションにより確認した。

第 6 章では，直流キャパシタ電圧一定制御を用いた三相 4 線式配電用 APLC の各相別基本波無効電流制御法について検討を行う。第 5 章において，任意の無効電流を注入し，電源電流を各相別に制御できることが明らかとなっている。本章においては，負荷側の基本波無効電流を制御ブロックにより算出し，それを用いて補償電流指令値を生成する。提案する制御法によって，中性線電流を抑制しながら，電源側において，負荷電流の基本波無効電流成分のみ補償可能であることを瞬時電力フローを用いた理論検討によって明らかにした。また，計算機シミュレーションにより提案する制御法の有効性および実用性を明らかにしている。

第 7 章では，4 レグ中性点クランプ式インバータ（neutral point clamped inverter: NPC インバータ）を用いた各相別無効電流制御法について検討を行う。3 レベルインバータである NPC インバータは，2 レベルインバータと比べてスイッチング素子の耐圧が低減可能である。また，スイッチングノイズも小さくなることから，LC フィルタの小型化が見込めるといったメリットを有する。電源電流指令値は，無効電流成分検出ブロックを通して算出される。電源電流の有効成分を再分配することにより，各相の DPF を 1.00 に保ちながら中性線電流が抑制される。また，計算機シミュレーションによって負荷変動発生時の動作や NPC インバータの直流キャパシタ容量を小さくした場合における検証を行い，提案する制御法の有効性および実用性を明らかにした。

第 8 章では，本論文で得られた研究成果および今後の研究課題について述べている。

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	不平衡負荷を有する三相 4 線式配電線におけるアクティブパワーラインコンディショナの電力品質保証 (Power Quality Compensation of Active Power-Line Conditioner in Three-Phase Four-Wire Distribution Feeder with Unbalanced Loads)
氏 名 (Name)	SABI Yuka
<p>In recent years, the stable supply of high-quality power has become more important than ever with the diversification of electrical products and the progress and utilization of information technology. Electric power is generated in power plants and distributed to consumers via transmission lines, substations, and other facilities by means of distribution lines. The three-phase four-wire distribution system is widely used in European countries, mainly EU member states, and in Asian countries such as China, Korea, and Thailand. The three-phase four-wire distribution system can supply both three-phase and single-phase loads simultaneously from a single distribution facility, thus significantly reducing facility costs compared to the combined use of three-phase three-wire and single-phase three-wire distribution systems used in Japan, the United States, Canada, and other North American countries.</p> <p>However, the connection of an unspecified number of single-phase loads to three-phase four-wire distribution feeders causes unbalanced phase currents, which results in current flowing into the neutral line. This causes heat generation in the transformer, which may increase power loss. With the increasing use of diode rectifiers in domestic appliances, the harmonic currents generated by the conversion of AC to DC power have led to a deterioration in power quality. Harmonic currents flowing into the surrounding power systems and equipment can cause malfunctions, overheating, abnormal noise, and other problems, and in the worst case, may lead to system shutdown, burnout, or destruction. Therefore, harmonic currents suppression is essential.</p> <p>This thesis consists of eight chapters.</p> <p>The importance of power quality compensation is described in Chapter 1. Chapter 2 describes the structure and characteristics of three-phase four-wire distribution feeders, the effects of harmonics on the equipment, and research trends in control methods for active power-line conditioners (APLCs), which are power quality compensation devices.</p> <p>In Chapter 3, the new control method for AP LC in three-phase four-wire distribution feeders with constant DC-capacitor voltage control is proposed for the case where nonlinear-loads are unbalanced connected to the grid and harmonic currents exist. A theoretical consideration using instantaneous power flow shows that the proposed control method can achieve sinusoidal source currents that are balanced and in phase with the receiving-end voltages. The effectiveness and practicality of the proposed control method are also clarified by computer simulation and experiment. Furthermore, it is experimentally confirmed that the output signal of the constant DC-capacitor voltage control block matched the fundamental active current component of the load currents.</p> <p>In Chapter 4, the individual-phase displacement power factor (DPF) control method for AP LC in three-phase four-wire distribution feeders using constant DC-capacitor voltage control is discussed. A theoretical consideration using instantaneous power flow shows that the proposed DPF control method achieves sinusoidal currents including reactive current components with unbalanced and arbitrary power factor on the source side while suppressing the neutral-line current. The</p>	

effectiveness and practicality of the proposed control method are also clarified through simulation and experimental.

In Chapter 5, the individual-phase reactive current control method for APLC in three-phase four-wire distribution feeders is discussed. The basic principle of the reference source currents, which injects reactive current on the source side and achieves unbalanced sinusoidal source currents, is explained. When reactive power control is performed using the calculated reference source currents, the currents on the source side become sinusoidal, but the neutral-line current increases. To solve this problem, the active components on the source side are redistributed. A theoretical consideration using instantaneous power flow shows that the proposed reactive current control method achieves sinusoidal currents with unbalanced and arbitrary reactive currents on the source side while suppressing the neutral-line current. Next, the basic principle of the individual-phase reactive current control method is considered by simulation and experiment, and its effectiveness is clarified. Finally, it is confirmed by computer simulation that a balanced three-phase source currents are achieved by compensating the receiving-end voltages and the transmission-end voltages, and that neutral-line current suppression is achieved under unbalanced conditions of receiving-end voltages and sending-end voltages.

In Chapter 6, the individual-phase fundamental reactive current control method for APLCs in three-phase four-wire distribution feeders using constant DC-capacitor voltage control is studied. In Chapter 5, it was shown that the source currents are controlled for each phase by injecting an arbitrary reactive current. In this chapter, the load-side fundamental reactive current is calculated by a control block and used to generate the reference compensation currents. A theoretical study using instantaneous power flow shows that the proposed control method compensates only the fundamental reactive current component of the load currents on the source side while suppressing the neutral-line current. Simulation results are also performed to clarify the effectiveness and practicability of the proposed control method.

In Chapter 7, the individual-phase reactive current control method using a 4-leg neutral-point-clamped inverter (NPC inverter) is discussed. The three-level NPC inverter can reduce the withstand voltage of the switching elements to a two-level inverter. In addition, switching noise is also reduced, which has the advantage that the LC filter can be downsized. The reference source currents are calculated through the reactive current component detection block. By redistributing the active components of the source currents, the neutral-line current is suppressed while keeping the DPF of each phase at unity. Simulation is carried out to verify the operation of the system when load fluctuations occur and when the DC-capacitor capacity of the NPC inverter is reduced, and to clarify the effectiveness and practicality of the proposed control method.

Chapter 8 describes the research results obtained in this thesis and future research topics.

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	佐飛 優花
審 査 委 員	主 査：山田 洋明
	副 査：若佐 裕治
	副 査：田村 慶信
	副 査：山口 真悟
	副 査：森田 実
論 文 題 目	不平衡負荷を有する三相 4 線式配電線におけるアクティブパワーライン コンディショナの電力品質保証 (Power Quality Compensation of Active Power-Line Conditioner in Thrcce-Phase Four-Wirc Distribution Feeder with Unbalanced Loads)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>本学位論文は、EU 加盟国を中心としたヨーロッパ諸国など世界で幅広く用いられている低圧配電方式である三相 4 線式配電において、不平衡で、かつ、非線形な単相負荷が接続される際に生じる受電端電圧の不平衡や高調波電流などの電力品質を低下させる要因について詳細に述べている。また、従来の電力品質保証法において、無効電力や高調波電流の抽出において複雑な演算を必要とするなどの問題点を明らかにしている。</p> <p>次に、直流キャパシタ電圧一定制御を用いた三相 4 線式アクティブパワーラインコンディショナの制御法を提案している。これは、アクティブパワーラインコンディショナを構成する 4 レグ構成の PWM インバータの直流キャパシタ電圧を一定にする直流キャパシタ電圧一定制御のみにより負荷側の基本波有効電流成分を演算できる特長があり、無効電力や高調波電流の抽出において演算を簡易化できる。計算機シミュレーションおよび実験により、IEC 規格を満足しない非線形負荷が接続された場合においても、高調波電流を約 1/3 に低減できることを明らかにしている。</p> <p>次に、各相の電圧および電流が不平衡である条件において、電力品質を改善する方法として各相別に基本波力率および無効電流を制御する手法について提案している。アクティブパワーラインコンディショナが出力する電流を再分配することで中性線電流を低減できる特長を持つ。計算機シミュレーションおよび実験により、中性線電流を 10%以下に抑制しながら、力率および高調波電流を補償できることを明らかにしている。</p> <p>さらに、提案するアクティブパワーラインコンディショナの実用化を念頭においた 4 レグ構成中性点クランプインバータを用いた各相別無効電流制御法を提案している。先に提案した回路構成では、PWM インバータの直流電圧を系統電圧の最大値より十分高くする必要があり、高耐圧の電解キャパシタおよびスイッチングデバイスが必要であった。中性点ク</p>	

ンブインバータにこれまでに提案した制御法を適用し最適な回路パラメータ設計を行うことで回路部品の低耐圧化を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内容は、中性線電流の低減効果と抑制に対する基準があるのか、実機における高調波低減効果がシミュレーション結果より低い要因について説明してほしいなどの質問があり、適切に回答がなされた。

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通りである。(関連論文 計 3 編, 参考論文 計 3 編)

- (1) Yuka Sabi, Hiroaki Yamada, Toshihiko Tanaka, Fuka Ikeda, Masayuki Okamoto, and Seong Ryong Lee, "Experimental Confirmation of Constant DC-Capacitor Voltage-Control-Based Strategy for an Active Power-Line Conditioner", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 11, No. 5, pp. 711-722, 2022.
- (2) Yuka Sabi, Hiroaki Yamada, Toshihiko Tanaka, Fuka Ikeda, Masayuki Okamoto, and Seong Ryong Lee, "Validation of a Constant DC-Capacitor Voltage Control Strategy for a Four-Leg Active Power-Line Conditioner: A Simulation and Experimental Study", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 13, No. 1, pp. 61-69, 2024.
- (3) Yuka Sabi and Hiroaki Yamada, "Receiving-End Voltage Compensation Method with NPC-Inverter-Based Active Power Line Conditioner in Three-Phase Four-Wire Distribution Feeder", Electricity, Vol. 5, No. 4, pp. 770-784, 2024.