

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	高調波補償機能を有する静止形無効電力補償装置の制御法 (Control Strategies for Static Var Compensator With Harmonics Compensation)
氏 名 (Name)	常盤 歩夢

電力系統に受電用変圧器を介して負荷変動の大きいアーク炉や圧延機などが接続されると、受電端電圧の変動やフリッカなどの無効電力変動障害が発生する問題がある。無効電力変動障害の対策として、thyristor-controlled reactor (TCR) と進相キャパシタから構成される他励式静止形無効電力補償装置 (SVC) および自励式 SVC (STATCOM) が広く普及している。しかしながら、TCR はサイリスタのスイッチングにより遅れ無効電流を制御するため、電源側に高調波電流が流出する問題がある。近年、パワーエレクトロニクス製品が広く普及しているが、これらの機器では、配電された交流電圧を直流に変換した後に電力を消費するためダイオード整流回路が内蔵されている。このダイオード整流回路は、高調波電流を発生することから、配電系統内の高調波電流が問題となっている。

本学位論文では、無効電力変動障害および高調波電流を同時に補償可能な高調波補償機能を有する SVC の制御法を提案し、その有効性を明らかにしている。第 1 章では、無効電力変動障害と無効電力補償装置について詳細に述べている。第 2 章では、高調波発生源を電圧源と電流源に分類し、それぞれに応じた高調波対策法について詳細に述べている。このとき、無効電力変動障害と無効電力補償装置として用いられている STATCOM の制御法およびハイブリッド SVC の研究動向について詳細に論じている。先に提案されている STATCOM の制御法では、負荷側の瞬時有効無効電力の演算を必要とし、工学的に明快であるが制御アルゴリズムが複雑である。これまで提案されているハイブリッド SVC では TCR と進相キャパシタから構成される SVC に LC 同調フィルタを追加する必要があり、進相キャパシタと TCR を用いた基本的な主回路構成の SVC を用いた回路トポロジーが提案されていない。これらの検討すべき課題を国内外における文献を引用しながら詳細に論じ、本学位論文の位置づけと目的を明らかにしている。

第 3 章では、直流キャパシタ電圧一定制御を用いた高調波補償機能を有する NPC インバータ方式 STATCOM の制御法を提案する。提案した制御法は、直流キャパシタ電圧一定制御のみを用いた簡易な制御法であり負荷側の基本波有効無効電流および高調波電流の演算ブロックを省略できる点に特長がある。はじめに、NPC インバータ方式 STATCOM に流出入する瞬時電力フローを詳細に論じ、STATCOM を構成する NPC インバータの直流キャパシタ電圧一定制御ブロックにより、負荷側の三相一括した有効電流の実効値を演算できることを明らかにしている。このとき、直流キャパシタ電圧一定制御ブロックにより演算された負荷側の三相一括した有効電流の実効値を用いて、制御ゲインを用いた負荷側の三相一括した有効電流の直交成分を演算することで簡易な電源側基本波無効電力制御が実現できることを明らかにしている。パワーエレクトロニクス用回路シミュレータである PSIM を用いた計算機シミュレーションにより、提案した制御法の有効性を確認している。さらに、縮小モデルを用いた実験装置を構築し実験により提案した制御法の有効性を確認している。シミュレーション結果および実験結果から、直流キャパシタ電圧一定制御のみを用いた制御法により、電源側の基本波無効電力を調整しながら高調

(和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度)

(about 800 words)

波電流を補償可能であることを確認している。シミュレーション結果および実験結果から直流キャパシタ電圧一定制御のみを用いた制御法により、国際標準規格である IEC61000-3-4 を満足することを確認している。

第4章では、直列形アクティブフィルタ(AF)を用いた新しいハイブリッド SVC を提案している。提案したハイブリッド SVC は、TCR と進相キャパシタを用いた基本的な主回路構成の SVC の進相キャパシタに直列形 AF を接続している点に特長がある。はじめに、提案したハイブリッド SVC の1相分の等価回路から電源側の高調波補償原理を詳細に論じている。このとき、直列形 AF の電源側高調波補償特性の理論式を導出し、周波数領域において高調波補償特性を明らかにしている。パワーエレクトロニクス用回路シミュレータ PSIM を用いた計算機シミュレーションにより、提案した新方式ハイブリッド SVC の有効性を確認している。シミュレーション結果から、直列形 AF を用いたハイブリッド SVC により力率が 1.00 でかつ正弦波電流を実現可能であることを確認している。このとき、進相キャパシタに接続された直列形 AF の変換器容量は負荷の定格と比較し 2.77% であり、経済性の点からも実用的であることを示している。さらに、シミュレーション結果から、配電系統の電圧歪に関して定められた国際標準規格である IEEE519-2014 を満足することを確認している。しかしながら、提案したハイブリッド SVC の制御法では電源電流を検出するための電流センサーが必要であり、電源側電流センサーを除去することができれば、新方式ハイブリッド SVC の実用性をさらに高めることができる。そこで、第5章では、電源側の電圧および電流を検出するセンサーが不要な新方式ハイブリッド SVC の新しい制御法を提案している。提案した制御法は、検出した負荷電流、TCR 電流および進相キャパシタ電流から電源電流を演算し、電源側の電圧および電流を検出するセンサーを省略できる点に特長がある。はじめに、新方式ハイブリッド SVC の提案した制御法を1相分の等価回路から詳細に論じ、第4章で提案したハイブリッド SVC 制御法と等価な高調波補償特性が実現できることを明らかにしている。PSIM を用いた計算機シミュレーションにより、提案した制御法の有効性を確認している。シミュレーション結果から、直列形 AF を用いたハイブリッド SVC により力率が 1.00 でかつ正弦波電流を実現可能であることを確認している。さらに、第4章と同様にシミュレーション結果から国際標準規格である IEEE519-2014 を満足することを確認している。

第6章では、本学位論文の結論と今後の検討課題を述べている。

(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	常盤 歩夢
審査委員	主 査：山田 洋明
	副 査：久保 洋
	副 査：山口 真悟
	副 査：田中 俊彦
	副 査：中島 翔太
	副 査：長谷川 一徳
論文題目	高調波補償機能を有する静止形無効電力補償装置の制御法 Control Strategies for Static Var Compensator With Harmonics Compensation
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>アーク炉や圧延機など大容量の機器が受電用変圧器を介して接続される電力系統では、これらの機器の大きな負荷変動によって受電端電圧の変動に伴うフリッカなどの無効電力変動障害が発生する問題がある。無効電力変動障害を補償する装置として、他励式および自励式静止形無効電力補償装置が広く普及している。他励式静止形無効電力補償装置は、サイリスタのスイッチングにより力率を調整するため、無効電力補償時に高調波電流が生じる。一方で、従来の自励式静止形無効電力補償装置は補償電流の演算が複雑化し演算負荷が大きい課題がある。本学位論文では、無効電力変動障害および高調波電流を同時に補償可能な高調波補償機能を有する静止形無効電力補償装置の制御法を提案し、有効性を明らかにしている。</p> <p>第 1 章では、無効電力変動障害と従来の無効電力補償装置についての研究背景と研究目的を論じている。第 2 章では、高調波補償機能を有する無効電力補償装置の技術動向について述べ、克服すべき課題について明らかにしている。</p> <p>第 3 章では、直流キャパシタ電圧一定制御を用いた高調波補償機能を有する Neutral-point-clamped (NPC) インバータ方式静止形無効電力補償装置を提案している。提案した制御法は、負荷側の基本波有効無効電流および高調波電流の演算を行う必要がない簡易な制御で無効電力および高調波電流を補償できる点に特長がある。はじめに、NPC インバータ方式静止形無効電力補償装置に流出入する瞬時電力フローを詳細に論じ、静止形無効電力補償装置を構成する NPC インバータの直流キャパシタ電圧一定制御系により負荷側の三相一括した有効電流の実効値を演算できることを明らかにしている。次に、パワーエレクトロニクス用回路シミュレータ PSIM を用いた計算機シミュレーションおよび縮小モデルを用いた実験装置により提案した制御法の有効性を確認し、無効電力および高調波を補償し、国際標</p>	

準規格 IEC61000-3-4 を満足する補償効果が得られることを明らかにしている。

第 4 章では、他励式静止形無効電力補償装置に対して直列形アクティブフィルタを用いた新しいハイブリッド静止形無効電力補償装置を提案している。これは、他励式静止形無効電力補償装置の進相キャパシタに直列形アクティブフィルタを接続している点に特長がある。はじめに、提案したハイブリッド静止形無効電力補償装置の一相分の等価回路から電源側の高調波を補償できる原理を詳細に論じている。次に、PSIM を用いた計算機シミュレーションにより、提案したハイブリッド静止形無効電力補償装置により、電源側において力率 1.0 がかつ正弦波電流を実現できることを確認している。このとき、直列形アクティブフィルタの変換器容量は負荷定格容量の 2.77%のみであり、実用的であることを示した。シミュレーション結果から受電端電圧のひずみに対して IEEE519-2014 を満足することを確認している。

第 4 章で提案したハイブリッド静止形無効電力補償装置では、電源側電圧および電流の検出が必要であった。第 5 章では、より実用性を高めるために電源側電流の検出が不要なハイブリッド静止形無効電力補償装置の新しい制御法を提案した。これは、キルヒホッフの電流則から既存のセンサ情報から電源側電流を演算し、電源側のセンサが不要である点に特長がある。提案した制御法において、一相分の等価回路から第 4 章で提案した制御法と等価であり、同等の補償効果が得られることを詳細に論じた。PSIM を用いた計算シミュレーション結果から、提案した制御法により電源側において力率 1.0 がかつ正弦波電流を実現できることを確認し、電源側電流センサが不要な提案方式の有効性を明らかにした。

第 6 章では、本学位論文の結論と今後の課題を述べている。

【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、①研究の位置づけについて回路方式の比較も重要であるが、現在や今後の電力事情やニーズに対して本研究の必要性を説明したほうがよい、②直流キャパシタ電圧一定制御で PI 補償器の後に移動平均 LPF を挿入する理由は何か、③3 章の提案方式で従来法と提案法の補償効果の差や演算量の低減効果について述べた方がよい、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 2 編であり、主な論文は以下の通りである。

- (1) Ayumu Tokiwa, Hiroaki Yamada, Toshihiko Tanaka, Makoto Watanabe, Masanao Shirai, and Yuji Teranishi, “New Hybrid Static VAR Compensator with Series Active Filter,” MDPI Energies, Vol.10, No.10, 14pages, 2017
- (2) Ayumu Tokiwa, Hiroaki Yamada, Toshihiko Tanaka, and Mitsunori Fukuda, “Harmonic Current Compensation Using Constant DC-Capacitor Voltage-Control-Based Strategy of Three-Level Neutral-Point-Clamped Inverter-Based STATCOM with Reactive Power Control,” IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.8, No.2, 2019 (2018 年 10 月, 掲載決定通知受領)