

博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

Nakata Atushi
氏名 中田 篤史
学位の種類 博士 (工学)
学位記番号 博 甲 第41号
学位授与 平成25年2月28日
学位授与条件 学位規定第3条第3項該当
論文題目 直列形電圧補償装置の開発における変換器の制御および回路設計に関する研究
(Studies on the Control and Circuit Design of a Power Converter for the Development of a Series Voltage Compensator)
論文審査委員 (主査) 教授 植田 明照¹
(審査委員) 教授 一柳 勝宏¹ 教授 村瀬 洋¹ 教授 鳥井 昭宏¹

論文内容の要旨

直列形電圧補償装置の開発における変換器の制御および回路設計に関する研究

電力系統における事故や負荷急変によって瞬時電圧低下が発生し、自動化された工場や半導体製造工場などの機器が停止し、近年問題視されている。需要家の受電点である負荷端電圧を瞬時電圧低下時にも一定に保つために、直列形電圧補償装置(Series Voltage Compensator, 以下 SVC)が用いられている。SVCは系統電圧と同期した電圧をパルス幅変調(Pulse Width Modulation, 以下 PWM)インバータによって発生させ、系統へ直列に挿入した変圧器を介して不足分電圧を重畳する装置である。SVCは、系統電圧を降圧する並列変圧器と交流を直流に変換する順変換器にて構成される並列器、直流を交流に変換するインバータと系統へ電圧を加える直列変圧器にて構成される直列器、両者を接続する中間リンクコンデンサ、順変換器、インバータが発生する PWM 電圧からリップル電圧を除去して正弦波状にする LCR フィルタで構成される。電圧形 PWM インバータにおいて、半導体素子の上下アームの短絡防止のため、オン、オフ切り替え時に、デッドタイムを設ける必要がある。デッドタイム期間中に半導体素子と逆並列に接続された環流ダイオードへ電流が流れることによってパルス列のデッドタイム電圧が発生する。フィルタのリアクルや変圧器の内部インピーダンスに電流が流れることによってインピーダンス電圧が発生し、電圧降下が発生する。

SVCを開発するためには、デッドタイム電圧とインピーダンス電圧の抑制、出力電圧の非線形性の抑制と適切なキャリア周波数の選択、リップル電圧を除去するための最適な LCR フィルタ値の算出が重要となる。これらはこれまで経験的に求められてきた。本研究では、これらを理論的に検討して定量的に最適値を求めて解決する手法を提案する。また、その理論が正しいかどうかをシミュレーションと実験により検証し、その成果を述べている。

第 1 章は緒論で、研究の背景として現状における高調波問題、フリッカと系統の電圧変動の問題、瞬時電圧低下の発生原因と頻度に関する調査及び現状におけるその対策法について紹介する。現状の対策法についての問題点を示し、それらに対する本論文の研究目的と本論文の構成について述べる。

第 2 章では SVC のデッドタイム電圧とインピーダンス電圧の抑制法について述べる。SVC は電圧低下を検出後、高速応答で補償電圧を出力する必要があるため、応答性に優れたオープンループ制御を用いている。オープンループ制御すると、デッドタイム電圧とインピーダンス電圧は SVC 出力電圧に重畳され、電圧降下が発生し、出力電圧が電流によって変化する問題が発生する。SVC をオープンループ制御した際に生じるデッドタイム電圧とインピーダンス電圧の発生に関する因を詳細に解析し、それらの発生量を理論的に算出する。デッドタイム電圧、および LC フィルタ電圧と変圧器のインピーダンス電圧の発生量を算出して、フィードフォ

ワード制御によってこれらの電圧を打ち消し、SVCの補償電圧が指令値通りの出力となる制御法を提案する。シミュレーションと実験によってその効果を確認し、定常特性と過渡特性の検証結果を示し、本方式の補償方法が優れた特性を有することを示す。

第3章ではSVCの出力電圧非線形性とキャリア周波数決定法について述べる。PWMインバータ出力電圧が非線形となる現象は知られているが、デッドタイム電圧やインピーダンス電圧などの誤差電圧による影響を考慮した場合の、変調率と出力電圧との関係が線形となる条件については、これまで十分な検討が行われていなかった。本章では出力電圧が線形、非線形となる条件を理論的に求め、PWMインバータのキャリア周波数を決定する手法を提案する。ゲート信号がデッドタイムによって消失しない変調率の上限率を求める。定格電圧を出力するのに必要な変調率と誤差電圧を補償するための変調率を合成して最大変調率を求める。最大変調率が最も大きくなる力率角の条件を求め、キャリア周波数が変化したときの最大変調率と出力電圧が線形となる変調率の上限との交点を求めてキャリア周波数最大値を求める。シミュレーションと実験によってその効果を確認し、設計法の妥当性を示す。

第4章ではSVCのLCRフィルタ設計法について述べる。これまで学界、産業界ではシミュレーションを行った結果、または実験を行った結果からLCRフィルタの最適値が求められてきた。本研究では電圧、電流、負荷の条件が変わっても理論的にLCR値の最適値を求める手法を提案する。電源とインバータの差電圧がフィルタのリアクトルにかかることによって電源周波数の4倍の周波数の正弦波で振幅変動する三角波状のリプル電流が流れる。そのリプル電流を振幅変動の関数と三角波の関数の積でモデリングする手法を提案し、リプル電流を解析的に求める。解析的に求めたリプル電流を用いてLCRフィルタを設計する。リアクトル L は、電流に含まれる最大リプル電流振幅値と基本波電流振幅値の比率から設計する。フィルタコンデンサ C は、コンデンサに流れる解析的に求めたリプル電流実効値と基本波電流実効値との比率による出力電圧のひずみ率から設計する。ダンピング抵抗 R は、フィルタに発生するリプル電圧とLC共振による振動が減衰する整定時間より共振の鋭さ Q 値の評価を行って設計する。求めたLCRフィルタの設計値でシミュレーションと実験を行い、設計値とシミュレーション結果および、実験結果を比較して設計法の妥当性を示す。

第5章では、本研究で得られた成果を各章ごとにまとめ、将来の発展の方向について簡潔に述べる。

論文審査結果の要旨

電力系統における事故や負荷急変によって瞬時電圧低下が発生し、自動化された工場や半導体製造工場などの機器が停止し、近年問題視されている。需要家の受電点である負荷端電圧を瞬時電圧低下時にも一定に保つために、直列形電圧補償装置(Series Voltage Compensator, 以下 SVC)が用いられている。SVCは系統電圧と同期した電圧をパルス幅変調(Pulse Width Modulation, 以下 PWM)インバータによって発生させ、系統へ直列に挿入した変圧器を介して不足分電圧を重畳する装置である。SVCは、系統電圧を降圧する並列変圧器と交流を直流に変換する順変換器にて構成される並列器、直流を交流に変換するインバータと系統へ電圧を加える直列変圧器にて構成される直列器、両者を接続する中間リンクコンデンサ、順変換器、インバータが発生するPWM電圧からリプル電圧を除去して正弦波状にするLCRフィルタで構成される。電圧形PWMインバータにおいて、半導体素子の上下アームの短絡防止のため、オン、オフ切り換え時に、デッドタイムを設ける必要がある。デッドタイム期間中に半導体素子と逆並列に接続された環流ダイオードへ電流が流れることによってパルス列のデッドタイム電圧が発生する。フィルタのリアクトルや変圧器の内部インピーダンスに電流が流れることによってインピーダンス電圧が発生し、電圧降下が発生する。SVCを開発するためには、デッドタイム電圧とインピーダンス電圧の抑制、出力電圧の非線形性の抑制と適切なキャリア周波数の選択、リプル電圧を除去するための最適なLCRフィルタ値の算出が重要となる。これらはこれまで経験的に求められてきた。本研究では、これらを理論的に検討して定量的に最適値を求めて解決する手法を提案している。また、その理論が正しいかどうかをシミュレーションと実験により検証し、その成果を述べている。

第1章は緒論で、研究の背景として現状における高調波問題、フリッカと系統の電圧変動の問題、瞬時電圧低下の発生原因と頻度に関する調査及び現状におけるその対策法について紹介している。現状の対策法についての問題点を示し、それらに対する本論文の研究目的と本論文の構成について述べている。

第2章ではSVCのデッドタイム電圧とインピーダンス電圧の抑制法について述べている。SVCは電圧低下を検出後、高速応答で補償電圧を出力する必要があるため、応答性に優れたオープンループ制御を用いている。オープンループ制御すると、デッドタイム電圧とインピーダンス電圧はSVC出力電圧に重畳され、電圧ひずみと電圧降下が発生し、出力電圧が電流によって変化する

問題が発生する。SVC をオープンループ制御した際に生じるデッドタイム電圧とインピーダンス電圧の発生に関する要因を詳細に解析し、それらの発生量を理論的に算出した。デッドタイム電圧、および LC フィルタ電圧と変圧器のインピーダンス電圧の発生量を算出して、フィードフォワード制御によってこれらの電圧を打ち消し、SVC の補償電圧が指令値通りの出力となる制御法を提案した。シミュレーションと実験によってその効果を確認し、定常特性と過渡特性の検証結果を示し、本方式の補償方法が優れた特性を有することを示している。

第 3 章では SVC の出力電圧非線形性とキャリア周波数決定法について述べている。PWM インバータ出力電圧が非線形となる現象は知られているが、デッドタイム電圧やインピーダンス電圧などの誤差電圧による影響を考慮した場合の、変調率と出力電圧との関係が線形となる条件については、これまで十分な検討が行われていなかった。本章では出力電圧が線形、非線形となる条件を理論的に求め、PWM インバータのキャリア周波数を決定する手法を提案した。ゲート信号がデッドタイムによって消失しない変調率の上限を求める。定格電圧を出力するのに必要な変調率と誤差電圧を補償するための変調率を合成して最大変調率を求める。最大変調率が最も大きくなる力率角の条件を求め、キャリア周波数が変化したときの最大変調率と出力電圧が線形となる変調率の上限との交点を求めてキャリア周波数最大値を求めた。シミュレーションと実験によってその効果を確認し、設計法の妥当性を示している。

第 4 章では SVC の LCR フィルタ設計法について述べている。これまで学界、産業界ではシミュレーション

を行った結果、または実験を行った結果から LCR フィルタの最適値が求められてきた。本研究では電圧、電流、負荷の条件が変わっても理論的に LCR 値の最適値を求める手法を提案した。電源とインバータの差電圧がフィルタのリアクトルにかかることによって電源周波数の 4 倍の周波数の正弦波で振幅変動する三角波状のリプル電流が流れる。そのリプル電流を振幅変動の関数と三角波の関数の積でモデリングする手法を提案し、リプル電流を解析的に求めた。解析的に求めたリプル電流を用いて LCR フィルタを設計した。リアクトル L は、電流に含まれる最大リプル電流振幅値と基本波電流振幅値の比率から設計する。フィルタコンデンサ C は、コンデンサに流れる解析的に求めたリプル電流実効値と基本波電流実効値との比率による出力電圧のひずみ率から設計する。ダンピング抵抗 R は、フィルタに発生するリプル電圧と LC 共振による振動が減衰する整定時間より共振の鋭さ Q 値の評価を行って設計する。求めた LCR フィルタの設計値でシミュレーションと実験を行い、設計値とシミュレーション結果および実験結果を比較して設計法の妥当性を示している。

第 5 章では、本研究で得られた成果を各章ごとにまとめ、将来の発展の方向について述べている。

以上のように、本研究は直列形電圧補償装置の制御および回路設計に関する重要課題について理論的に解明してシミュレーションと実験で実証しており、その工学的価値は高く、博士(工学)の学位論文として十分な価値があるものと認められる。

(受理 平成 25 年 3 月 19 日)