

半導体電力変換装置の PWM 制御に関する研究

学位論文内容の要旨

電力用半導体デバイスの発達に伴い、インバータ、コンバータ等の半導体電力変換装置が急速に普及した。その応用範囲は、産業分野をはじめ、交通輸送分野、家庭電器、電子装置用電源、無停電電源等に及ぶ。特に、インバータを用いた交流電動機の可変速駆動は、交流電動機の制御性を大幅に改善すると同時に、省エネルギー、保守の省力化が達成できるため、産業界に与えた影響は大きい。しかし、これら半導体電力変換装置が発生する高調波に起因する各種の障害が問題になっている。そこで、高調波の少ないPWMパルスパターンを作ることによって、インバータでは駆動電動機のトルク脈動や電磁騒音の低減、コンバータでは誘導障害等の高調波障害の除去が重要な研究課題となる。

半導体電力変換装置の開発と同時に、制御用マイクロプロセッサも急速な進歩を遂げた。当初、システム制御の領域で用いられていたマイクロプロセッサは、その後の処理能力の高性能化によって、より変換回路動作に近い部分への適用が可能になった。これにより、パワーエレクトロニクス分野は、新しい局面を向かえる。すなわち、それまでアナログ回路で行っていたPWMパルスの発生が、マイクロプロセッサを用いたデジタル回路によって実現可能になった。その結果、従来のアナログ回路では実現の困難であったPWMパルスパターンの低ひずみ化や、制御目的に応じたPWM方式の実現等、ソフトウェアの融通性を活かしたPWM制御が可能となる。しかしその一方で、デジタル回路に適した各種PWM方式の基本的な特性、評価方法等、理論的な考察が不十分であり、フィルター等回路パラメータの決定には、実験やシミュレーションに頼っている部分が多い。

本論文は、このような観点から、マイクロプロセッサによる最適なPWMパルスパターンの発生方法と、その評価方法、ならびに高調波によるひずみ成分の計

算法を研究し、まとめたものである。本論文は、ソフトウェアによるPWMパルスの発生という点で一貫しており、その基本的な技術は空間ベクトルを用いたPWM制御法である。

本論文におけるPWM方式の大きな特徴は、負荷のローパス特性を考慮した上でPWMパルスを作成している点にある。従来のPWM方式がPWM波形自身に含まれる高調波成分を重視していたのに対し、本論文では負荷の特性を考慮し、負荷電流に含まれる高調波に相当する評価指数を定義して、その最小化を行っている。これによって、誘導電動機等を駆動した際に出力電流に含まれる高調波成分は最小化され、トルク脈動や、電磁騒音の低減が可能となる。

第1章では、半導体電力変換装置を研究する意義、本研究の目的等について述べている。

第2章では、電圧形PWMインバータを取り上げ、本論文で扱うPWM方式の基本となる考え方とPWMパルスパターンの位置による最適化法について述べている。まずはじめに、アナログ回路でのPWM方式の代表である三角波比較方式について、その動作を説明し、提案する方式との相違点を明確にする。次に、本論文におけるPWM方式の基本的な考え方である空間ベクトル法について述べる。三相電力変換器の場合、空間ベクトルを用いることで、三相の出力波形の対称性を容易に考慮でき、零相成分を削除できる利点がある。この章では、サンプリング周期（PWMパルスを作成する周期）を一定とし、その中でパルスの位置を変数に取り、評価指数の最小化を行い、PWMパルスパターンの最適化を行っている。このようにして得られたパルスパターンは、出力位相角指令に対しては複雑な依存性を示すものの、出力振幅指令に対しては線形となるため、位相角に対するテーブルさえ準備すれば、極めて簡単な演算により任意位相、任意振幅のPWM制御が可能になる。

第3章では、出力波形の改善をより大幅に行うために、出力位相角に依存させて、サンプリング周期を変化させている。第2章で提案した評価指数は、出力位相角に対して強い依存性を示している。そこでこの位相角に対する依存性を低減することで、トータルとしての評価指数を改善しようというのがこの章の目的である。具体的には、変調波関数とその周波数変調率を定義して評価指数を最小化し、PWMパルスパターンの最適化を行う。この手法をキャリア周波数変調法と呼び、出力電流のひずみ率、低次高調波成分、誘導機駆動時のトルク脈動の改善が可能となる。

第4章は、電圧形PWMコンバータの制御法と、回路パラメータの決定法について論じている。コンバータは、三相交流電源から直流電源を得る電力変換装置であり、入力力率を1、正弦波状の入力電流を達成すると同時に、出力直流電圧を一定に制御することを目的としている。正弦波状の入力電流を得るため、第2章で述べたPWM方式を導入している。PWMコンバータは、制御対象が複雑であるため、これまではシステムのコントローラ設計を重視して研究が進められてきた。本章では、最適レギュレータ技法を用いたコントローラの設計法と同時に、回路パラメータの決定法を提案している。回路パラメータは、装置の大きさ、高調波含有率等を左右する値であり、重要視されるべきものである。ここでは、ひずみ特性因子を定義し、それを用いたひずみ率の計算法を提案し、ひずみ率から回路パラメータの決定を行っている。ひずみ特性因子は、各PWM方式が持っている固有の因子であり、その原点は、第2章で提案した評価指数の考え方に基いている。ひずみ特性因子によって、実験やシミュレーションを行うことなく、簡便で汎用性の高いひずみ率の計算が可能になる。

第5章は、半導体電力変換器におけるスイッチング周波数の高周波化に伴う問題を論じている。電圧形インバータの場合、半導体デバイスのOFF時間の遅れによる電源短絡を防止するため、アーム短絡防止期間を設ける必要がある。この期間は通常サンプリング周期に比べて十分短い値に設定されるため無視できたが、スイッチング周波数の増加に伴い、出力波形のひずみの原因となる。また、PWM制御に用いるマイクロプロセッサにおいては、パルス発生基準となるタイマーの分解能の影響が、スイッチング周波数の増加と共に無視できなくなる。これらについて、ソフトウェア上の補償法、ならびに新しいPWM方式を提案する。

第6章は、ひずみ特性因子を基に、本論文におけるPWM方式を総合的に評価している。まず初めに、ひずみ特性因子による誘導機駆動時の出力電流ひずみ率、トルク脈動率の計算法を述べ、ひずみ特性因子の物理的意味を説明し、各種PWM方式の比較を行う。さらに多重PWM方式におけるひずみ特性因子を求め、その特性変化を比較する。

第7章では各章の特徴と得られた結果をまとめ、今後の研究課題について述べている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	土谷	武士
副査	教授	深井	一郎
副査	教授	長谷川	淳
副査	助教授	福田	昭治

学位論文題名

半導体電力変換装置のPWM制御に関する研究

半導体電力変換装置を用いることにより、省エネルギーや省保守が達成できるため、製造産業分野や交通輸送分野等に広範囲に用いられている。その主要な制御方法はパルス幅変調法（PWM）である。しかし反面、PWM制御は高調波の電圧や電流を発生するという問題を抱えている。そこで、できるだけ高調波の少ないPWMパルスパターンを作成し、高調波障害の除去を行うことが、重要な研究課題である。

本論文は、このような観点から、最適なPWMパルスパターンの作成方法と、その評価方法、ならびに高調波によるひずみ成分の計算法を提案し、論じたものである。本論文は7章より構成されている。

第1章では、半導体電力変換装置を研究する意義、本研究の目的等について述べている。

第2章では、電圧形PWMインバータを取り上げ、本論文で扱うPWM方式の基本となる考え方と、PWMパルスパターンの位置による最適化法について述べている。サンプリング周期（PWMパルスを作成する周期）を一定とし、その中でパルスの位置を変数に取り、高調波電流の実効値に相当する評価指数の最小化を行い、PWMパルスパターンの最適化を行っている。このようにして得られたパルスパターンは、出力位相角指令に対しては複雑な依存性を示すものの、出力振幅指令に対しては線形となるため、位相角に対するテーブルさえ準備すれば、極めて簡単な演算により任意位相、任意振幅の出力波形が実現可能になる。

第3章では、出力波形の改善をより大幅に行うために、出力位相角に依存させて、サンプリング周期を変化させ、パターンの最適化を行っている。第2章で用いた評価指数は、出力位相角に対して強い依存性を示している。そこで、この位相角に対する依存性を低減することで、トータルとしての評価指数を改善しよう

というのがこの章の目的である。具体的には、変調波関数とその周波数変調率を定義して評価指数を最小化し、PWMパルスパターンの最適化を行っている。この手法をキャリア周波数変調法と呼び、出力電流のひずみ率、低次高調波成分、誘導機駆動時のトルク脈動の改善が可能になる。

第4章は、電圧形PWMコンバータの制御法と、回路パラメータの決定法について論じている。コンバータは、三相交流電源から直流電源を得る電力変換装置であり、入力力率を1、正弦波状の入力電流を達成すると同時に、出力直流電圧を一定に制御することを目的としている。正弦波状の入力電流を得るため、第2章で述べたPWM方式を導入している。PWMコンバータは、制御対象が複雑であるため、これまではシステムのコントローラ設計を重視して研究が進められてきた。本章では、最適レギュレータ技法を用いたコントローラの設計法と同時に、回路パラメータの決定法を提案している。回路パラメータは、装置の大きさ、高調波含有率等を左右する値であり、重要視されるべきものである。ここでは、ひずみ特性因子を定義し、それを用いたひずみ率の計算法を提案し、ひずみ率から回路パラメータの決定を行っている。ひずみ特性因子は、各PWM方式が持っている固有の因子であり、その原点は、第2章で提案した評価指数の考え方に基づいている。ひずみ特性因子によって、実験やシミュレーションを行うことなく、簡便で汎用性の高いひずみ率の計算が可能になる。

第5章は、半導体電力変換装置におけるスイッチング周波数の高周波化に伴う問題を論じている。PWM制御では、スイッチング周波数の高周波化に伴い、それまで無視できたアーム短絡防止期間や、マイクロプロセッサのタイマーの分解能の影響が大きくなり、出力波形のひずみの原因になる。これらについて、ソフトウェア上での補償法、ならびにその影響を受け難い新しいPWM方式を提案している。

第6章は、ひずみ特性因子を基に、本論文におけるPWM方式を総合的に評価している。ひずみ特性因子による誘導電動機駆動時の出力電流ひずみ率、トルク脈動率の計算法を述べ、ひずみ特性因子の物理的意味を説明し、各種PWM方式の比較を行っている。さらに多重PWM方式におけるひずみ特性因子を求め、その特性変化を比較している。

第7章は結論であり、以上のまとめと今後の研究課題について述べている。

以上のように、本論文は半導体電力変換装置のPWM制御時の最適なパルスパターン作成法、ならびに解析法に関して、多くの有用な知見を与えるものであり、パワーエレクトロニクス、ならびに電気機器工学に貢献するところ大である。よって、著者は博士(工学)の学位を授与される資格のあるものと認める。