

氏名	児山 裕史
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第 8965 号
学位授与年月日	平成 31年 3月 25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	単位電力変換器を多直列接続したカスケード・マルチレベル変換器の性能向上に関する研究

主査	筑波大学教授	工学博士	只野博
副査	筑波大学教授	博士(工学)	岩室憲幸
副査	筑波大学教授(連携大学院)	博士(工学)	山口浩
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	磯部高範
副査	東京工業大学准教授	博士(工学)	萩原誠

論 文 の 要 旨

直流送電などの電力系統向け大容量電力変換器に対し、単位変換器を多直列接続したカスケード・マルチレベル変換器の応用が注目されている。本論文ではカスケード・マルチレベル変換器の主な技術課題として、損失・適用する半導体スイッチング素子・制御システム構成があることを挙げ、これら3つをそれぞれ改善する技術の検討・開発と、それによる電力変換器の高性能化、また将来の導入拡大への影響について論じている。

損失低減に対しては、1パルス制御を適用してスイッチング損失を低減するための制御法の提案を行った。非常に高い電圧の変換器を構成する場合、カスケードの段数が多くなるため、従来変換器の制御に用いられるPWM（パルス幅変調）ではなく、個々の半導体スイッチング素子が電源周波数でスイッチングを行う1パルス制御の適用が可能である。これまでの1パルス制御では変調率が低い際に段間バランス制御が有効に作用しなかったが、本研究では1パルス制御のアルゴリズムを改善することで、変調率が変動しても常にコンデンサ電圧をバランスさせることができることを示した。本研究の成果により1パルス制御の実用性が向上したといえる。1パルス制御の実現により電力損失は低減されシステムの経済性が向上するため、カスケード・マルチレベル方式を用いた大容量の電力変換器のさらなる導入拡大が期待できる。

使用する半導体スイッチング素子として、近年実用化と社会実装が進んでいるSiC（炭化ケイ素）スイッチング素子のカスケード・マルチレベル変換器への適用の可能性について検討した。カスケード段数が比較的少ない6.6 kV配電系統クラスの系統連系変換器において、既存のSi（シリコン）-IGBT（絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ）のみで構成する場合、現状の低圧SiC-

JFET（接合型電界効果トランジスタ）のみで構成する場合、それらを組み合わせたハイブリッド方式の場合で損失を比較検討し、ハイブリッド方式に優位性がある見通しを得た。実際にSi-IGBTとSiC-JFETと複数の変調方法を組み合わせたハイブリッド方式の6.6 kV連系トランスレス・カスケード・マルチレベルSTATCOMを製作し、動作と損失を実証した。実定格試作機の損失・体積測定結果を基に前記3つの回路構成を比較し、ハイブリッド方式が損失・体積の両面で合理的な構成であるという結果を示した。これにより新しい半導体スイッチング素子であるSiCスイッチング素子が、カスケード・マルチレベル変換器においても性能向上に寄与しうることを示した。

制御システム構成の改良にかかる研究として、デジチェーン型分散制御を適用する場合の電流制御モデルの構築と実証・評価を行った。カスケードの段数が100以上にも及ぶ直流送電クラスのカスケード・マルチレベル変換器においては、高い電位にある多数のスイッチング素子にそれぞれ駆動信号を送り、また各段のコンデンサ電圧を得るために用いる制御信号線が多数かつ複雑化することが課題となる。分散制御により制御信号線数の低減が期待されるが、制御器間の通信遅延を考慮した電流制御モデルが不明であるため制御の理論設計ができなかった。そこで本論文では、通信遅延と電圧指令値サンプリングに起因する各セルの遅延を明らかにし、遅延を考慮した理論的な電流制御モデルを導いた。これにより、デジチェーン型分散制御の制御応答の特性と、実際に適用する際の制御系の設計方法を明らかにした。電流制御モデルを導出したことにより、実際に分散制御を適用する際に理論モデルで制御応答設計ができるようになった。本成果により、カスケード・マルチレベル変換器への分散制御の適用が進み、光ファイバや光電変換部品が削減されるなど、制御システム構成の簡略化が実現できることが期待される。また、構成すべきネットワーク構成の設計にも役立ち、カスケード・マルチレベル変換器の特徴であるスケラブルな変換器構成の実現を後押しすることも期待できる。

本論文で示された研究結果により、カスケード・マルチレベル変換器の低損失化、小型化、構成の簡素化などが実現できる。これらの成果はカスケード・マルチレベル変換器の高性能化と実機適用拡大に寄与するものであり、すなわち高性能な自励式電力変換器の適用・導入拡大に貢献する。社会にとっては、送電にかかる消費エネルギーの低減、電力・配電システムの安定化、自然エネルギー導入の促進などの利益がもたらされることが期待される。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

カスケード・マルチレベル変換器は1996年以降に考案された比較的新しい回路トポロジーであるが、2003年に高圧直流送電に適用可能な方式がMarquardtらにより考案されると、学界および産業界において急速に研究と実用化が進み、現在までにヨーロッパにおける洋上風力向けの直流送電や北米における高密度需要地への直流ケーブル送電など、多数の実用化がなされている。現在でもその制御や、損失低減や体積削減といった性能向上に関し多くの研究者が取り組んでいる、この技術分野における中心的なテーマである。本論文は、これまでの先行研究をよく調査し

分析した上で、カスケード・マルチレベル変換器の性能向上を図るいくつかの新しい技術の提案と実証を行っている。

カスケード・マルチレベル変換器の特徴は、入手可能な半導体デバイスによって構成される小容量の変換器を多数組み合わせることで大容量変換器を構成することにある。特に直流送電のように非常に高い電圧に適用する場合、カスケードの段数は100を超える。多数の変換器のスイッチングのタイミングをずらすことで、等価的なスイッチング周波数を高くすることが可能であり、1つのデバイスのスイッチング周波数は数百Hz以下という、比較的低い周波数とすることが可能である。一般的な電力変換器では、高調波や受動素子の小型化の観点からスイッチング周波数をあげることが必要とされ、損失の低減とはトレードオフの関係になっている。カスケード・マルチレベル変換器においては、回路レベルでの違いにより、一般的な電力変換器に求められる制御法やデバイスの選定条件とは違うものが求められる。本論文は、このようなカスケード・マルチレベル変換器において特に求められる制御法、デバイスの選定、制御システム構成に関する技術の検討・開発と、それによる電力変換器の高性能化、また将来の導入拡大への影響について論じているものであり、有用な研究であるといえる。

カスケード・マルチレベル変換器における最大の特徴とも言える、スイッチング周波数の低減に関し、その究極的な解である1パルス制御のロバスト化を実現する制御の提案は、上記の特徴を最大限発揮するために必要なものである。これまでに実用化されているカスケード・マルチレベル変換器では主に制御上の理由によりPWM制御を行っているといえ、高調波などの観点からは本来は必要ないスイッチングを行っていたといえる。本論文で提案、実証を行ったロバストな1パルス制御の実用化により、電力損失が低減されシステムの経済性が向上するため、本研究成果の利用価値は高い。

デバイスの選定に関しては、近年実用化が進むSiCパワーデバイスの適用について検討を行っている。カスケード・マルチレベル変換器の上記の特徴によれば、1つのデバイスのスイッチング周波数は低くなるため、非常に高い電圧に適用する場合、SiCパワーデバイスの高いスイッチング性能のシステムへの影響が小さい。しかし、6.6 kV連系トランスレス・カスケード・マルチレベルSTATCOMにおいては、カスケードの段数がそれほど高くはないため、ハイブリッド構成を用いることでSiCパワーデバイスのスイッチング性能を活かせることを見出した。また、これらの成果からカスケード・マルチレベル変換器に使用する半導体スイッチング素子に今後求められる設計や性能に関する指摘をしている点は高く評価できる。具体的には、スイッチング損失は大きいが高調波損失の低減が狙えるSiC-SJ (Super Junction) -MOSFET (MOS型電界効果トランジスタ) などのデバイス構造の採用について言及しており、最新の研究動向を把握した的確な指摘であるといえる。

デジーチェーン型分散制御の適用に関する研究は、スケーラブルに大容量変換器が実現できるという、カスケード・マルチレベル変換器の1つの特徴を後押しするための技術に関する研究であり実用性が高いといえる。分散制御についてデモンストレーションなどの発表は多数あるが、制御の点での理論的な検討例はこれまでにほとんどなかった。そのようななか、理論的な電流制御モデルを示したことは学術的な価値も高い。今後カスケード・マルチレベル変換器の実用例が

増えるに従い、制御システムの簡易化の要求や、分散制御を適用した場合の制御の最適化などの要求があると考えられ、本研究はその先進的な取り組みといえる。

以上のように、本論文で示された研究成果は、学術的にも実用的にも価値の高いものであると認められ、本論文は学位論文として価値のある論文であると結論付けられる。

〔最終試験結果〕

平成 31 年 2 月 20 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。