



Title	12/10ヘックス結線スイッチトリラクタンスモータとその制御手法
Author(s)	竹村, 望
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/105450
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (竹 村 望)

論文題名

12/10ヘックス結線スイッチトリラクタンスモータとその制御手法

論文内容の要旨

近年、電気自動車（EV）は世界的に急速に普及しており、中国では安価なEVが数多く発表されている。現在、EVの駆動モータには永久磁石同期モータ（PMSM）が一般的に使用されている。しかし、高価な永久磁石コストや希土類資源の材料リスクなどの問題があり、永久磁石を使用しない高性能なモータが望まれている。実際に、テスラ社のモデル3などに誘導モータ（IM）が採用され、RENAULT社のZOEや日産自動車のアリアには巻線界磁モータ（WFSM）が採用された実績があるが、一方で、IMやWFSMはPMSMに比べてモータサイズが大型化し、低速・高トルク領域の効率が低下する問題がある。それに対してスイッチトリラクタンスモータ（SRM）は、永久磁石を使用せず、構造がシンプルで堅牢な構造をしているため、高速回転化が可能であり、さらにSRMは集中巻のため、分布巻のPMSMやIMよりもコイルエンドが小さく、高出力密度化が期待できる。このような理由から、本研究では、SRMに注目した。SRMは永久磁石を使用していないため、モータの分解が容易で、保守性やリサイクル性が高いという利点があるが、一方でトルクリップルや振動・騒音が大きく、さらにSRMの駆動には3相非対称インバータや6相インバータが必要であり、インバータコストの増加などの問題がある。

本論文では、これらの問題を解決するため、まずモータの観点から、新たにヘックス結線を有する10突極12スロット（12/10）SRMを提案し、電気回路方程式からトルク式を導出し、高トルク密度・低トルクリップルといった提案結線の優位性を理論的に示した。そして、2次元有限要素法解析を用いた磁場解析により、従来の8突極12スロット（12/8）SRMおよび12/10スター結線SRMよりも高効率でトルクリップルが小さく、かつ振動騒音の原因となるラジアル力リップルが小さいことを示し、そのメカニズムについて考察した。その結果、提案するヘックス結線の相電流は、単位電流あたりのトルクが最大となる理想的な電流のAC成分／DC成分比率に近いためにトルク密度が高く、弱め界磁に必要なd軸電流が小さいため、ラジアル力振幅が小さいことを示した。また、12/8 SRM、12/10スター結線SRM、そして提案する12/10ヘックス結線SRMの3種類の試作機を製作し、実機評価にて提案結線の優位性を検証した結果、12/10 SRMは計算値と測定値の差が大きく、その差は回転数の上昇に伴い大きくなることを示した。その原因について2次元有限要素法を用いた磁場解析により検証した結果、コントローラの制御周期により理想的なスイッチタイミングからずれ、電流位相が遅れることが原因であることを明らかにした。次に、制御周期によるモータ性能低下の対策として、PWM制御を用いたスイッチタイミング遅れ対策を提案し、その効果を2次元有限要素法解析により検証した結果、制御周期を考慮しない理想的なスイッチタイミングに対してほぼ同等のトルクが得られ、提案する制御手法の有効性を示した。

次にインバータ技術として、従来の6相インバータに比べてスイッチング素子数を低減可能な9スイッチインバータおよび改良型9スイッチインバータを提案した。そして2次元有限要素法を用いた磁場解析により、12/10ヘックス結線SRMのワンパルス電圧駆動について解析した結果、9スイッチインバータのワンパルス電圧駆動時には回生電流が発生し、それにより平均トルクが低下する課題を明らかにした。次に9スイッチインバータを用いてSRMをベクトル制御で駆動する際の制約事項および各素子のスイッチングパターンを決定する際のルールを明らかにした。そして2次元有限要素法解析を用いて、従来の6相インバータと同様に、9スイッチインバータを用いてベクトル制御による12/10 SRMの駆動が可能であることを示した。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (竹 村 望)			
論文審査担当者	(職)	氏 名	
	主 査	准教授	宮坂 史和
	副 査	教授	神原 淳
	副 査	教授	舟木 剛
	副 査	教授	中村 健二 (東北大学大学院工学研究科)
	副 査	教授	楡井 雅巳 (長野工業高等専門学校工学科)

論文審査の結果の要旨

近年、電気自動車 (EV) は世界的に急速に普及しており、中国では安価な EV が数多く発表されている。現在、EV の駆動モータには永久磁石同期モータ (PMSM) が一般的に使用されている。しかし、高価な永久磁石コストや希土類資源の材料リスクなどの問題があり、永久磁石を使用しない高性能なモータが望まれている。本研究では、構造が単純で堅牢かつ高出力密度であり、希土類永久磁石を使用しないスイッチトリラクタンスモータ (SRM) に注目している。SRM は永久磁石を使用していないため、モータの分解が容易で、保守性やリサイクル性が高いという利点があるが、一方でトルクリップルや振動・騒音が大きく、さらに SRM の駆動には 3 相非対称インバータや 6 相インバータが必要であり、インバータコストの増加などの問題がある。

本論文では、これらの問題を解決するため、まずモータの観点から、新たにヘックス結線を有する 10 突極 12 スロット (12/10) SRM を提案し、高トルク密度・低トルクリップルといった提案結線の優位性を理論的に示している。そして、2 次元有限要素法解析により、従来の 8 突極 12 スロット (12/8) SRM および 12/10 スター結線 SRM よりも高効率でトルクリップルが小さく、かつ振動騒音の原因となるラジアルカリリップルが小さいことを示し、そのメカニズムについて考察している。また、12/8 SRM、12/10 スター結線 SRM、そして提案する 12/10 ヘックス結線 SRM の 3 種類の試作機を製作し、実機評価にて提案結線の優位性を検証するとともに、制御周期によるモータ性能低下の対策として、PWM 制御を用いた位相補償制御を提案し、その効果を 2 次元有限要素法解析により検証している。

次にインバータ技術として、従来の 6 相インバータに比べてスイッチング素子数を低減可能な 9 スイッチインバータを提案し、9 スイッチインバータを用いて SRM をベクトル制御で駆動する際の制約事項および各素子のスイッチングパターンを決定する際のルールを明らかにしている。そして 2 次元有限要素法解析を用いて、6 相インバータと同様に、ベクトル制御による SRM の駆動が可能であることを示している。また、さらなるスイッチング素子数低減のため、改良型 9 スイッチインバータを提案し、2 次元有限要素法を用いた磁場解析により、12/10 ヘックス結線 SRM のワンパルス駆動について解析し、改良型 9 スイッチインバータの可能性を検証するとともに、9 スイッチインバータの課題を明らかにしている。

以上のように、本論文は SRM のトルクリップル・振動騒音低減およびコスト低減のために新しい巻線構造、インバータ回路およびその制御手法を提案してその有効性を示しており、安価な SRM を実現するための基礎技術を確立している。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。