T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	ハイブリッド自動車用スイッチトリラクタンスモータの小型高出力化・高効率化および低騒音化に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	清田恭平
Author(English)	Kyohei Kiyota
出典(和文)	学位:博士（工学）, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9781号, 授与年月日:2015年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:千葉　明,赤木　泰文,渡邉　朝紀,高橋　宏治,竹内　希,堺　和人
Citation(English)	Degree:, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9781号, Conferred date:2015/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

学位論文要約

論文題目：ハイブリッド自動車用スイッチトリラクタンスモータの小型高出力化・高効率化および低騒音化に関する研究

氏名：清田恭平

論文概要

近年地球環境問題を解決するために，内燃機関とモータを組み合わせたハイブリッド自動車(HEV)の開発が進んでいる。ハイブリッド自動車駆動用の電動機には，小型高出力，短時間の最大トルク，最大出力での広範囲な可変速駆動，高効率，そして低コストが要求される。現在 HEV や電気自動車に用いられるモータは高出力かつ高効率という特徴を有する埋込永久磁石同期電動機(IPMSM)が主流である。現在 IPMSM には希土類(レアアース)であるネオジウム(Nd)やジスプロシウム(Dy)を使用したネオジム磁石を使用している。しかし，レアアースの産出国や産出量は限られているため，原産国による輸出規制や需要の増大により供給が逼迫し値段が高騰している。これに対応するため，代替となる生産地の確保と同時に，レアアース使用量の削減を目的とした，レアアース使用量を削減したモータの研究が日本国内外で進められている。

レアアースを使用しないモータの一つとして，機械的に非常に頑丈であり，大量生産時に低コスト化も実現できるスイッチトリラクタンスモータ(SRM)が挙げられる。しかし, SRM には低出力密度・低トルク密度，低効率，振動・騒音，特殊なインバータ，以上 4 点の課題がある。トルク密度に関しては，既に第二世代トヨタプリウスに使用されている 50kW，6000r/min の IPMSM と同じ体格で，同等のトルク，出力，効率を持つ SRM の研究報告がある。しかし，現在販売されている第三世代の IPMSM はより高出力，高速化されている。同時に，電流実効値を減少させる必要がある。また，トルク密度・出力密度および効率を維持した上で，騒音を小さくする必要がある。

本研究では，レアアース磁石を使用せずに，小型高出力・高効率・低騒音を達成可能なモータを設計，製作し，実験にて有効性を明らかにすることを目標とした。2009 年発売の第三世代 IPMSM と同じ外径・軸長を有する SRM にて，同等またはそれ以上の出力・トルク・効率・騒音を，同等以下の電流実効値で達成することにより, SRM が IPMSM を代替可能な性能を有することを明確にした。

本論文は全 7 章から構成されている。各章の概要を以下に示す。

第１章　　序論

第１章では，本研究の背景と研究の目的を明らかにしている。また，本論文の構成を述べている。

第2章　　自動車用スイッチトリラクタンスモータの技術動向

第2章では，本論文で検討するSRMの基本動作を概説するとともに，SRMのトルクと効率の向上ならびに騒音の低減法について概説し，SRM の自動車駆動用モータとしての位置づけと課題を明確にしている。また，他の自動車用省レアアースモータについて概説している。

第3章　　小型高出力・高効率SRMの検討

第 3 章では，第三世代 HEV 用 IPMSM の特性を解析により確認した上で，第三世代 HEV 用 IPMSM と同一の軸長，固定子外径，電流実効値で，同等あるいはそれ以上のトルクを達成可能なSRMの固定子・回転子構造について明らかにした。先行研究において，多極化および低鉄損材の使用により第二世代IPMSMと同等のトルク・出力・効率を，同一の固定子外径・軸長で達成されてきた。しかし，第三世代IPMSMではより小型，高出力化されており，なおかつ最大電流実効値が減少している。そこで，まず先行研究である多極化と低鉄損材料により，より小型である第三世代IPMSMと同じ外径・軸長においても，同等のトルクが達成可能であることを示した。その上で，巻線直列数を増加させることにより電流実効値を目標IPMSMと同等またはそれ以下で達成可能であることを示した。なお，一般的にモータの巻線直列数が増加すると巻線のインダクタンスが増加し，高速領域にて電流が立ち上がりにくくなり，出力が低下する。特にIPMSMでは磁石による速度起電力により電流を低速領域ほど流せなくなる。一方，SRMは磁石を使用しないため，速度起電力が発生しない。そのため，高速領域において電流連続制御を適用し，電流に直流成分を重畳させることにより，基底速度，最大トルク時と同じ出力が可能である。本研究では，電流連続制御を使用することにより，最高回転数においても巻線に最大トルク出力時の電流実効値となる電流を印加可能であることを示し，その場合，最大出力が IPMSM の 1.7 倍まで増加可能であることを示した。最後に，三次元有限要素法解析によって，SRMは第三世代HEV用IPMSMと同体積で同等以上のトルクを発生可能であることを明らかにした。

第4章　　各燃費規格におけるIPMSMとSRMの比較

第4章では，実際にSRMをHEVに適用した際に，より高効率にSRMを使用する手法を各燃費規格を用いて明らかにした。SRMの高効率領域はIPMSMの高効率領域より高速側に移動している。一方，現在のハイブリッド自動車では現行の目標IPMSMに合わせたギヤ比を使用している。したがって，IPMSM を SRM にそのまま置き換えた際に，最大効率が同等であるにもかかわらず，モータ効率が低い領域で使用される恐れがある。そこで，実際の燃費規格に基づいて，モータを駆動させた時の電力量消費率を比較した。この際にギヤ比を変更した場合の計算を行うことにより，より SRM に適したギヤ比の設定を明らかにした。具体的には4種類の燃費規格を用いて評価を行った。すなわち，日本の燃費規格であるJC08，アメリカの燃費規格であるUDDSおよびHWFET，および欧州の燃費規格であるNEDCの4種類の燃費規格である。燃費計算により，特に高速で走行を行う燃費規格において設計SRMの電力量消費率が目標IPMSMと同等または改善されることを示した。また，設計SRMではギヤ比をIPMSMより高速側とすることでより電力量消費率を改善

可能であることを示した。

第 5 章　　設計 SRM の実負荷試験及び解析との比較

第 5 章では，解析で得られた結果が妥当であるか，実機試験によって明らかにした。実機試験により，目標とする IPMSM と同等の最大トルク，1.7 倍の最大出力，同等の最大効率を，IPMSM より低い電流実効値にて達成することを実験的に明らかにした。また，目標 IPMSM と同等の効率を達成可能であることを明らかにした。

また，実機試験の結果，低速大トルク領域および高速高出力領域において解析時から 5%以上解析結果から効率が低下することを明らかにした。効率が低下した原因について，低速領域と高速領域に場合分けして考察を行っている。

第 6 章　　SRM の円筒化による効率・騒音改善

第 6 章では，SRM の無負荷時の騒音や機械損を低減する新しい回転子構造を提案した。SRM は高速領域の無負荷駆動時に大きな騒音が発生する。また，騒音の増加と同時に機械損も増加する。高速領域における騒音や機械損増加の要因を明らかにし，改善する必要がある。しかし，風損や風切り音を解析的に導出することは困難である。そこで，円筒型の擬似回転子を用いて突極による風損および風切り音による影響を定量的に評価した。これにより，高速回転時の無負荷時の騒音や機械損が回転子の突極構造にあることを定量的に明らかにした。

次に，風損および風切り音を低減するために，新しい円筒型回転子を提案した。回転子極間にオフセットを有する薄型のリブを設けることにより，回転子のギャップ面の表面を円筒型にする。薄型のリブにより非対向時インダクタンスの増加，すなわちトルク・効率の減少が最小限になる。しかし，高速回転時において，薄型のリブは遠心力によりリブが変形し，ギャップ長を小さくする。そこで，リブ部にオフセットを追加することにより，高速回転時のギャップへのはみ出し量が小さくなることを明らかにした。また，薄型のリブにより，低速領域の無負荷に近い領域における効率を維持したまま，高速領域の効率が改善することを，解析を用いて明らかにした。実機を試作，無負荷駆動試験を行い，実機における騒音低減効果を明らかにするした。

第 7 章　　結論

本論文における成果を要約し，今後の課題について述べている。