

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,渡邊 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)	論文要旨
Type(English)	Summary

# 論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻： Department of	電気電子工学	専攻	申請学位(専攻分野)：博士 Academic Degree Requested	博士 (工学)	Doctor of
学生氏名： Student's Name	清田恭平		指導教員(主)： Academic Advisor(main)	千葉明	
			指導教員(副)： Academic Advisor(sub)		

## 要旨(和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

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)を使用したネオジウ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。

はじめに、第三世代 IPMSM と同じ外径・軸長で同等またはそれ以上のトルク・出力・効率を有する SRM を明らかにする。SRM は電流実効値が大きくなる傾向がある。一般的に、出力あたりの電流実効値を減少させるには巻線数を増加させることが有効であるが、高速側で出力が維持できない問題がある。そこで巻線数を増加させることにより、高速領域における最大出力を維持させながら最大電流実効値を IPMSM の 83%まで低減可能であることを示した。さらに、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明らかにした。

また、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。一般的に HEV での多用点をういて各モータの比較を行っている。しかし、実際の HEV の動作点は連続的に移動しているため、多用点での比較では動作点毎の重み付けを考慮できない。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計算、評価し、米国の高速走行モードおよび欧州の走行モードにおいて消費エネルギーが IPMSM より低いことを明らかにした。さらにギヤ比を増加させることにより、消費エネルギーをより低減可能であることを示す。

さらに、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する必要がある。一般的に、実負荷試験はミニモデルを使用して行われる。そのため、解析との誤差の議論が定性的であった。実機試験では、試験条件を解析時と同一に設定した。すなわち、解析時と同じ実機モデルを試作し実験を行った。実機モデルを使用した実負荷試験により、IPMSM と同等の最大トルク、1.7 倍の最大出力を、IPMSM より低い電流実効値で達成可能であること、IPMSM と同等の効率を達成可能であることを実証した。さらに、低速かつ高トルクの領域、および高速かつ高出力の領域で解析誤差が大きくなることを明らかにし、低速かつ高トルクの領域では材料特性およびコイルエンド部の影響、高速かつ高出力の領域では鉄損およびインダクタタタンスの解析誤差により、効率の低下が発生することを明らかにした。

最後に、SRM の無負荷時の騒音を低減する新しい回転子構造を提案する。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。一般的には、回転子極間にリブを付ける手法があるが、遠心力により高速走行時にギャップ間が狭くなる。そこで、オフセットを施した薄型リブを提案した。提案構造により、高速領域の無負荷時から低負荷時の効率が向上することを解析によって確認した。また、実機試験により、騒音が低減可能であることを明らかにする。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。  
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)  
Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻 : Department of	電気電子工学	専攻	申請学位 (専攻分野) : Academic Degree Requested	博士 (工学)	Doctor of
学生氏名 : Student's Name	清田恭平		指導教員 (主) : Academic Advisor(main)	千葉明	
			指導教員 (副) : Academic Advisor(sub)		

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

Permanent magnets with rare earth materials are widely used in an interior permanent magnet motor (IPMSM) in Hybrid Electric Vehicles (HEVs). The recent price variation of Rare-earth materials has become a serious concern. A Switched Reluctance motor (SRM) is one of the candidates for HEV Rare-earth free motors. In this thesis, an SRM is developed with dimensions, maximum torque operating area, and maximum efficiency that all compete with the IPMSM installed in 3rd generation HEV.

First, it is shown that the above requirements can be satisfied with a designed SRM within the maximum RMS current of the IPMSM. At the high speed, simulation results show that the output of the designed SRM is found to be greatly enhanced with respect to that of the IPMSM.

Second, a comparison of energy consumption between the SRM and the IPMSM using four standard driving schedules is carried out. In American highway driving schedule and the European driving schedule, the SRM is found to have better efficiency because its efficiency is high at the high-rotational-speed region.

Third, the same size test machine has been constructed and test results are presented over the entire speed range. It is found that a shaft output of 100 kW, which is 1.7 times of that of the IPMSM is possible at high rotational speed under the voltage and current ratings. The possible operation area in a torque and speed plane is found to be enhanced. It is also found that the design stage prediction is close to the test results except in the low rotational speed and the high torque region, and high speed and high power region.

Finally, a cylindrical outer shape rotor with offset structure is proposed and a comparison to the conventional SRM rotor is carried out to reduce the windage loss and the acoustic noise caused by the salient poles. It is found that the efficiency is improved due to the windage loss reduction. It is also found that the acoustic noise is significantly reduced in the proposed rotor design.

備考 : 論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意 : 論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。  
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).