

氏名	スライマン エルワン ビン SULAIMAN ERWAN BIN
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博第850号
学位授与の日付	平成24年9月5日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	Design Studies on Less Rare-Earth and High Power Density Flux Switching Motors with Hybrid Excitation/Wound Field Excitation for HEV Drives (HEV駆動用省レアアース高出力密度ハイブリッド界磁/巻線界磁形フラックススイッチングモータの設計に関する研究)
論文審査委員	主査 准教授 小坂 卓 教授 竹下 隆 晴 教授 岩崎 誠

## 論文内容の要旨

Hybrid electric vehicles (HEVs), using combination of an internal combustion engine (ICE) and one or more electric motors, are widely considered as the most promising clean vehicles. One example of successfully developed electric machines for HEVs is interior permanent magnet synchronous machine (IPMSM), due to its smaller size and lighter weight providing with design freedom of the vehicles and its higher efficiency contributing to less fuel consumption. As an example, from the historical progress of IPMSM installed on Toyota HEVs, the power density of each motor employed in Lexus RX400h'05 and GS450h'06 has been improved five times and more, respectively, compared to that of IPMSM installed on Prius'97. One of the driving forces behind this successful improvement has been the adoption of combination of reduction gear with IPMSM operated at high-speed. However, IPMSM design tends to be difficult because permanent magnet (PM) is embedded in the rotor core. The mechanical strength relies mainly on thickness and number of bridges around PM, but high number of bridges degrades the maximum torque capability due to increases in leakage flux of PM. Therefore, a new candidate of flux switching machine (FSM) with rugged rotor structure suitable for high-speed operation and the ability to keep high torque and power density is treated as the subject to study in this thesis. This thesis deals with the design studies on high power density hybrid excitation (HE) /wound field excitation (FE) FSM for HEV drives. Firstly, research background, related works including IPMSM used in HEV, issues of IPMSM for further improvements, and research objectives are discussed in Chapter 1. Then, classifications of several types of FSM and the 12slot-10pole HEFSM selected for HEV applications are explained in

Chapter 2. Under similar restrictions and specifications of the IPMSM used in an existing HEV, drive performances of the original 12slot-10pole HEFSM are examined. Since the initial performances are far from the target requirements, design improvements using “deterministic optimization method” to treat several design parameters are conducted using commercial 2D FEA package, JMAG-Studio ver. 10.0, released by JSOL Corporation. The improved design, which successfully achieves the target performances as well as enough mechanical strength being possible to operate at the maximum speed of 12,400r/min, is discussed in Chapter 3. Another infirmity of this motor is the presence of high pole numbers, resulting in that the required PWM frequency becomes very high. To reduce the supply frequency of inverter, various combinations of slot-pole HEFSMs such as 6s-4p, 6s-5p, 6s-7p and 6s-8p are designed and analyzed in Chapter 4. Among various slot-pole combinations of HEFSMs discussed in Chapter 4, the problem of high torque ripple rate more than 50% in 6s-4p and 6s-8p HEFSMs is difficult to solve. On the other hand, the 6s-5p HEFSM has less torque ripple and a better efficiency at high speed operating conditions compared with other designs and thus, it is selected for further analysis. However, to realize high torque and power density, the design motor requires high current density which leads to necessity of complex cooling system to dissipate the heat. To overcome this issue, 6s-5p HEFSM-2 with a low-torque, low current density and higher speed employing high reduction gear is proposed in Chapter 5. The target torque is reduced to 210N-m with the introduction of reduction gear ratio of 4:1 to get similar axle torque of the IPMSM via reduction gear. Since the rotor mechanical strength is strong enough to operate it at high speed, the target speed of the motor is increased to 20,000r/min. Although the 6s-5p HEFSM-2 has successfully achieved the new target drive performances, the problem of unbalance pulling force is serious and difficult to overcome. Therefore, the finally designed 12s-10p HEFSM examined in Chapter 3 is again selected for further analysis. Even though the proposed machine requires high frequency to operate it at high speed, it can be overcome by introducing high frequency switching devices such as SiC and GaN semiconductor devices. In addition, it also has no pulling force as well as very less torque ripple which is suitable for high speed HEV applications. Further design reconsiderations are made and the final performances which satisfy the target requirements are demonstrated in Chapter 5. Recently, the enormous annual usage of rare-earth magnet has brought about the price up of Neodymium ( $N_d$ ), Dysprosium ( $D_y$ ) and Terbium ( $T_b$ ) which are indispensable to provide the rare-earth magnet with high coercivity as the additives. From a view point of cost reduction, the finally designed 12s-10p HEFSM-2 is analyzed for less rare-earth magnet by reducing the volume of PM in stages. The achieved performances are discussed in Chapter 5. Finally, by removing all PM in the finally designed 12s-10p HEFSM discussed in Chapter 5, a new structure of 12s-10p FEFSM is proposed. The 2D-FEA based performance prediction results of the finally designed machine, which fulfills the target performances, is demonstrated and discussed in Chapter 6. A prototype of the finally designed FEFSM is built and some preliminary experimental results show that the proposed FEFSM is good candidate of electric machine without PM for HEV drives.

## 論文審査結果の要旨

近年、地球温暖化対策のためのCO<sub>2</sub>排出量削減へ向け、内燃機関と電気駆動を組み合わせたハイブリッド車（以下、HEV）が普及拡大している。電気駆動の基幹要素技術の一つであるモータには、小型軽量・高効率の要求から、現在、ネオジムやディスプロシウムで組成されるレアアース磁石を用いた埋込磁石形同期モータが主として用いられているが、HEVの普及拡大に伴ってレアアース資源の価格高騰・供給不安が顕在化している。この問題から現行の小型軽量、すなわち高出力密度の要求水準、高効率の要求水準を満たしつつ、省あるいは脱レアアース磁石化を図る新たなモータの開発が喫緊の課題となっている。

本論文では、HEV駆動用の新たなモータとして、レアアース磁石と巻線界磁を界磁磁束源として併用したハイブリッド界磁フラックススイッチングモータ(以下、HEFSM)ならびに磁石を一切使用しない巻線界磁形フラックススイッチングモータ(以下、FEFSM)を提案し、各種制約条件を考慮した工学的な設計検討を行い、その有用性について纏めたものである。

本論文の各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、現行市販HEV搭載のIPMSMの出力密度やモータ効率の要求水準を示し、IPMSMで一層の高出力密度化、高効率化を目指した場合の難易性について説明している。その上で、E. Hoang氏らによって提案されたHEFSMをHEV駆動用モータの観点から見た特長・優位点を示し、その設計に要求される課題と本研究の意義・目的を明確にしている。

第2章では、現在までに提案されている種々のフラックススイッチングモータを構造、動作原理の観点から分類し、それぞれ特長・課題について整理している。

第3章では、12スロット10極(12s・10p)のHEFSMをベースに、その課題である高トルク化の観点から重要となる設計形状パラメータを磁場解析により明らかにしている。その上で、HEV駆動モータとしての各種制約条件を考慮しつつ要求性能を満足するモータ設計法を示し、設計した12s・10p機の高出力密度・高効率HEV駆動用モータとして優位性を明らかにしている。

第4章では、12s・10p機の駆動電源周波数が高いという難点を克服すべく、その動作原理から選択可能な4種の低極数HEFSMについて設計検討を行い、高出力密度、高効率の観点から、6s・5pHEFSMの優位性を明らかにしている。

第5章では、第2章の12s・10pHEFSMを出発点に、最高回転数を引き上げて必要モータ最大トルクを低減し、一層の高出力密度化を図る設計策について検討している。加えて、省レアアース磁石設計について検討し、従来性能を維持したまま、磁石量を約60%低減可能であることを明らかにしている。

第6章では、第5章の成果を発展させたFEFSMを提案している。第2章で述べた設計法を用い、ターゲットHEVの駆動用モータとして12s・10p機の設計検討を行い、レアアースレスモータながら、極めて高い出力密度、高い効率特性が得られることを示している。設計機を試作し、基本的な実験特性評価を行い、解析結果との比較から解析性能評価結果の妥当性を検証している。

第7章では、本研究で得られた成果をまとめ、残された課題について言及している。

本論文では、HEFSM、FEFSMについて、省・脱レアアース化を図りつつ高出力密度と高効率を両立可能な新たなモータとして、その優位性を定性的、定量的に明らかにした。これらの研究成果は、我が国が先導するHEVの基幹要素技術であるモータ技術への新たな発展に寄与するものと期待される。本論文の内容は、2編の審査有論文として電気学会論文誌などの学術雑誌に掲載され、3編の審査有国際会議論文として口頭発表されており、内1編は国際会議でStudent Paper Awardを受賞し、学会でも高く評価されている。

以上、本論文は、博士(工学)の学位として受理するに値するものと認められる。