

学位論文の要旨

氏名

野中 剛

学位論文題目

永久磁石可変界磁モータの研究

モータの小形高出力化，広範囲高効率駆動化は永遠の課題である。その課題克服の最先端が永久磁石同期モータである。希土類永久磁石を採用した永久磁石同期モータは小形高出力であるが，高速にいたる広範囲を高効率で駆動することは困難である。同期モータはかつて巻線界磁式の可変界磁モータが主流で，未だに多くの者が「V曲線」を学んでいる。近年，電磁石が永久磁石へと換わり，可変界磁による広範囲高効率化は後退した。希土類永久磁石の威力の大きさに，界磁調整機能を捨てても小形高出力化が優先されている現状である。しかし，希土類永久磁石を用いて可変界磁機能をもたせることができれば，上記課題に対し最高のモータができると考えられる。

本論文では，電気自動車用モータ（EVモータ）を想定し，次世代を担う小形高出力広範囲高効率駆動化技術として，永久磁石可変界磁モータを提案し，その特性について明らかにする。まず，考案した2種類の永久磁石可変界磁モータのしくみと，永久磁石可変界磁モータの最大出力制御，最大効率制御の達成方法について説明する。さらに，2種類の提案モータを試作し広範囲高効率駆動化の実証結果，加えて，永久磁石可変界磁モータの研究に付随して開発した小形高出力広範囲高効率駆動化に貢献した個々の技術についても述べる。

第1章では，研究の目的を述べ，本論文の概要の説明とともに本研究の位置付けについて言及した。永久磁石可変界磁モータにいたるモータ開発の背景と現在の問題点を示し，本論文の目的と各章の概要を示した。

第2章では，小形で効率が良い埋込磁石同期モータ（IPMモータ）をベースに，様々な構造の永久磁石可変界磁モータを検討した。特に，界磁を弱めた状態において鉄損がより減少する構造を模索し，方向性としては，界磁を弱めた状態においてロータから出てゆく磁束自体が減少するような構造を検討した。その結果より，提案する2種類の新構造永久磁石可変界磁モータのしくみを考案し，本構造に至る研究の経緯を説明した。

第3章では，永久磁石可変界磁モータの研究に付随して生まれ，次章で説明する具体的な設計や試作に用いられた新技術として，「磁束集中IPMモータ」，「加圧成形コイル」と「高強度鋼板ロータコア」について論じた。永久磁石可変界磁モータは界磁を自由に調整することが可能であることから，従来よりも大きな界磁を設定することが可能となる。永久磁石可変界磁モータを広範囲高効率化のみならずより小形高出力化する技術として「磁束集中IPMモータ」を開発した。従来の永久磁石同期モータをより高出力化することは，各回転速度においてより高トルク化するということである。従来と同じ電磁部サイズで高トルク化するには磁気回路の磁路強化が必要となり，ステータコイルの占有スペースが圧迫される。コイルの占有スペースを縮小したにも係わらず，コイルの導体断面積を拡大する技術として「加圧成形コイル」を開発した。さらに，従来の電磁鋼板を用いたロータの耐遠心力を強化し，約2倍の高速回転化をなし得る技術として，「高強度鋼板ロータコア」を開発した。

第4章では、永久磁石可変界磁モータの広範囲高効率駆動について検討した結果を述べた。広い可変速範囲のそれぞれの回転速度において、界磁の強さや電流位相角をどのような値にすれば最大出力制御が達成できるのか、また、それぞれの出力状態において、界磁の強さや電流位相角をどのような値にすれば最大効率制御が達成できるのかを明らかにした。さらに、検討結果を確認するため、試験用永久磁石可変界磁モータを試作し、広範囲駆動に対する効率評価を行った。効率評価は、最大回転速度 22000 min^{-1} 、最大出力 10 kW の範囲内で行われ、固定界磁に対して最大20%以上の効率向上を確認し、検討結果を実証できた。

第5章では、EV用 52 kW 永久磁石可変界磁モータとして、可変機構付永久磁石可変界磁モータの設計と試作を行い、その基本特性について評価した。さらに、ベクトル制御における電流位相角をより広範囲に制御し、同時に界磁を調整する方法としてマップ制御を行い、その動作結果を検証した。永久磁石可変界磁モータは界磁が変化すると誘起電圧定数やトルク定数などのモータ定数が変化するため、固定界磁モータを駆動するための従来インバータではベクトル制御の位相角を広範囲に制御できず、モータを駆動することができない。また、インバータには界磁を調整する機能がない。そのため、モータの駆動状態に合わせて界磁とインバータの指令が適切に制御される永久磁石可変界磁モータ駆動システムを開発した。

第6章では、界磁の強さがおのずから変化するような永久磁石可変界磁モータについて論じた。界磁の強さを正確に調整する可変機構は、広範囲高効率駆動を実現する永久磁石可変界磁モータには必要なものであったが、可変機構にかかる費用と搭載スペースが増大する欠点もあった。モータの駆動状態に応じて、界磁の強さがおのずから変化するような永久磁石可変界磁モータとして、筆者等は可変機構を有しない小形で低コストな簡易可変界磁モータを考案した。このモータでは、負荷トルクに応じて界磁の強さが、おのずから変化する。この簡易可変界磁モータは、外部からの機械的な可変機構を有しないだけでなく、電気的な操作も必要としないため、従来の永久磁石モータ用インバータのみで駆動できる。従来モータと同サイズで製作した試作機の構造と効率評価について説明した。

第7章では、以上得られた知見より結論を総括した。

Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

Research on Permanent Magnet Variable Magnetic Flux Motors

Name: Nonaka Tuyoshi

It is an eternal challenge to make motors be small size with high output power, and be driven at wide speed range on high efficiency. The top of the challengers is the permanent magnet synchronous motor. In the past, the variable magnetic flux motor (VMFM) with wound-field was used as mainstream of synchronous motor, and even now, many people learn “V-curve”. Recently, because of magnificence of high performance permanent magnets, electromagnets on the synchronous motor were switched over by permanent magnets and the trend toward aspiring the wide speed range and high efficiency drive declined. Small size high output power feature given by rare earth permanent magnet have been given priority for development more than the adjustment function of wound-field synchronous motors. In other words, synchronous motors have made the progress which gave priority to small size high output power drive than wide speed range high efficiency drive. However, if the variable flux function is combined with the motor with rare earth magnet, the best motor would be made for the wide speed range and high efficiency drive.

This paper proposes permanent magnet VMFMs (PMVMFMs) which are assumed to be used for electric vehicles (EV motor), as a next generation motor with small size high output power wide speed range high efficiency drive technique, and the paper clarifies the characteristics of the PMVMFMs. First, structures of proposed two types of PMVMFMs, strategies of a maximum output power control and a maximum efficiency control are explained. Further, two kinds of prototypes of motors are made and experimental results are demonstrated to confirm the effectiveness of the motors and controls. In addition, technologies which contribute to small size high output power wide speed range high efficiency drive in relation to the research on PMVMFMs.

In Chapter 1, the purpose and position of this research are mentioned as well as the outline of this paper. The background of development to reach the PMVMFMs, the current problems, the purpose of this paper and the summary of each chapter are mentioned.

In Chapter 2, two kinds of the new structure PMVMFMs, which are proposed in Chapter 5 and 6, are explained. Besides, various PMVMFMs based on small and efficient IPM motors are devised. The structure whose iron loss decreases more for more weakened magnetic flux are considered and, particularly, the structure whose magnetic flux itself from rotor decreases when magnetic flux is weakened are searched. Furthermore, technical contents which were obtained in the process to reach proposed structures are explained.

In Chapter 3, “Concentrated Flux IPM Motor”, “Press Formed Coil” and “High Strength Steel Plates Rotor Core” are discussed as the new technologies which were introduced for the design and the prototype productions mentioned in the next chapter. These technologies were born with the research on PMVMFMs. “Concentrated Flux IPM Motor” technique makes PM motors more small size and high output power by intensifying the gap flux density. By applying this technology, the PMVMFMs can have higher flux density than conventional PM motors when high output power is needed. On the other hand, the PMVMFMs can reduce the iron loss by weakening magnetic flux when high output power is not needed. “Press Formed Coil” technique offers expanding conductor cross-sectional area of a coil and reducing occupation space of the coil at

once. To increase the output power of a motor means to increase the torque of the motor for every rotating speed. Expansion of magnetic circuit is needed to increase torque with keeping the same electromagnetism part size as conventional machine. Consequently, the occupation space of stator coil is reduced. The technique was developed to solve this problem. “High Strength Steel Plates Rotor Core” technique was developed to realize about two times of conventional high-speed rotation. The rotor made of the high strength steel plates can overcome higher centrifugal force than conventional rotor.

In Chapter 4, the results of the consideration of wider range higher efficiency drive of a PMVMFM are reported. Optimum values of magnetic flux and current phase angle for the maximum output power control or the maximum efficiency control are clarified. To confirm the considered results, a PMVMFM prototype for tests is built and efficiency is evaluated over wide speed range. The efficiency evaluation is carried out over speed range within 22000 min^{-1} and power range of max power 10 kW. Maximum efficiency improvements more than 20 % for fixed magnetic flux are demonstrated and the results of the consideration are proved.

In Chapter 5, a PMVMFM prototype with the variable magnetic flux mechanism is designed and built as 52 kW EV motor, and the basic characteristics are estimated. Furthermore, the map control, which controls a current phase angle of the vector control more widely and also controls magnetic flux with map at once, is introduced. The experimental results are verified. Because the motor constants such as the induced voltage constant or the torque constant change when magnetic flux of the PMVMFM changes, conventional inverters used to drive conventional fixed magnetic flux motors cannot drive a PMVMFM without widely current phase angle control. In addition, conventional inverters do not have a function to regulate the magnetic flux of motor. Therefore a drive system of the PMVMFM, which controls the variable magnetic flux mechanism and the inverter appropriately in accordance with various driving states of the motor, is developed.

In Chapter 6, a 10 kW PMVMFM prototype without the variable magnetic flux mechanism are designed and built. The motor is used for variable load and is inferior to the motor with the variable magnetic flux mechanism. The variable magnetic flux mechanism to adjust the strength of the magnetic flux is necessary to the PMVMFM which achieves wide speed range high efficiency drive, however, there are drawbacks of volume and cost for the variable magnetic flux mechanism. Therefore, the PMFMVM without variable magnetic flux mechanism is desired. In the motor, the strength of the magnetic flux is required to change naturally according to the drive state of the motor. The small size, low-cost “Simple” PMVMFM (SPMVMFM) without the variable magnetic flux mechanism is invented. The strength of the magnetic flux changes naturally according to the load torque of the motor. Because without not only variable flux mechanism but also electrical operation, the SPMVMFM of this paper can be driven by a conventional inverters for conventional PM motors. The structure and efficiency evaluation of the prototype motor built in the same size of conventional one are explained.

In Chapter 7, the conclusions of this research are summarized.