

| | |
|---------|--------------------------------------|
| 称号及び氏名 | 博士（工学） 戸田 広朗 |
| 学位授与の日付 | 平成 26 年 3 月 31 日 |
| 論文名 | 「各種モータの特性に及ぼす無方向性電磁鋼板の磁気特性の影響に関する研究」 |
| 論文審査委員 | 主査 森本 茂雄 副査 石亀 篤司 副査 小西 啓治 |

論文要旨

無方向性電磁鋼板は、モータや発電機などの鉄心材料として用いられており、今日の社会を支える重要な軟磁性材料である。近年、エネルギーの効率的利用の観点から、各種モータに対する高性能化と省エネルギー化への要求はますます厳しくなっている。なぜならば、日本における発電量の半分以上はモータによって消費され、モータの効率を平均 1%向上させれば、50 万 kW クラスの発電所一基相当分の電力が削減できるからである。

更に、地球温暖化や大気汚染などの環境問題の観点から、自動車に対する CO₂ 削減や燃費規制が強化されるなかで、自動車業界ではハイブリッド自動車(HEV)や電気自動車(EV)の開発と実用化が急速に進展している。これらに使われるモータには小型化、高出力化や高効率化が強く求められるため、永久磁石同期モータ(PMSM : Permanent Magnet Synchronous Motor)が多く採用されている。したがって、鉄心材料である無方向性電磁鋼板にも、その目的に適した特性の改善が強く求められている。一方、各種モータの高性能化と高効率化のためには、モータの特徴にあった鉄心材料の選択や最適な材料利用が必要と考えられる。

無方向性電磁鋼板の磁気特性は、JIS 規格において磁束密度の振幅 1.5T、周波数 50Hz で鉄損値 $W_{15/50}$ 、磁界の強さ 5000A/m での磁束密度 B_{50} によって示されている。そして、0.35mm、0.50mm、0.65mm 厚の 3 種類の板厚と鉄損に応じて、35A210~440、50A230~1300、65A800~1600 の 24 種類が規定されている。規格記号の先頭の数字 2 桁は呼称厚さ(mm)の 100 倍を示し、「A」は無方向性電磁鋼板を表す記号、続く 3 桁の数字は $W_{15/50}$ (W/kg) の最大値の 100 倍を示す。

一般に、低鉄損の高級品は Si 含有量が多く、低級品は Si 含有量が少なく鉄損が高い。そして、電磁鋼板の飽和磁束密度は Si 含有量が増すほど低下するため、磁束密度 B_{50} は Si 含有量が多いほど低下する傾向を示す。すなわち、一般的に無方向性電磁鋼板の磁束密度 B_{50}

は低鉄損化と共に低下する。

従来から広く使用されてきた誘導モータの特性に及ぼす無方向性電磁鋼板の磁気特性の影響については、主に上記鉄損 $W_{15/50}$ の観点から種々の検討が行われている。

例えば、600W の単相誘導モータと 400W の 3 相誘導モータの特性に及ぼす電磁鋼板の影響を調査した結果では、その効率は素材鉄損 $W_{15/50}$ が低いほど向上する傾向を示すが、同時に磁束密度 B_{50} にも強く依存すると報告されている。また、単相および 3 相誘導モータの特性に及ぼす電磁鋼板の影響を網羅的に調べた結果では、1.5T での鉄損と 1.0T での透磁率を素材特性として用いることで、モータ効率を精度良く予測できると報告されている。

しかし、近年、エアコン、冷蔵庫、洗濯機などの家電製品や HEV、EV の駆動モータへの適用が拡大している PMSM の特性に及ぼす鉄心材料の影響に関する系統だった報告はほとんどない。PMSM では誘導モータに比べて銅損が顕著に減少するため、モータ特性に及ぼす無方向性電磁鋼板の影響は異なると考えられる。

また、誘導モータでは、素材磁束密度の改善による高効率化の効果が大きいと考えられているため、従来よりも高磁束密度の無方向性電磁鋼板を用いて磁気特性の影響を明確にすることは、省エネルギー化に大きく貢献すると思われる。

一方、希土類磁石の原料であるレアアース資源の問題から、磁石を使用しないスイッチトリラクタンスモータ (SRM) への関心が高まっている。SRM の高効率化のためには、鉄心材料である電磁鋼板の鉄損低減が必要と考えられるが、実際に種々の電磁鋼板を用いて SRM を試作し、そのモータ特性に及ぼす磁気特性の影響を調べた報告はほとんどない。

さらに、巻線時の能率向上と電磁鋼板を打ち抜く際の歩留り向上のために、モータの固定子 (ステータ) を分割鉄心にする場合が増えている。無方向性電磁鋼板は完全な等方性材料ではなく、ある程度の異方性があるため、その磁気特性は通常、素材の圧延方向とその直角方向の試験片の平均値で評価されている。したがって、分割コアモータの特性に及ぼす素材磁気特性の影響について、圧延方向とその直角方向別の磁気特性がモータ特性に及ぼす影響を検討した結果はほとんど報告されていない。

以上に述べた課題を考慮し、本論文では、PMSM と SRM の効率とモータ鉄損に及ぼす無方向性電磁鋼板の磁気特性の影響を検討し、それらの鉄心材料選択時に最適な磁気特性指標を提示するとともに、その理由を明確化することを目的とする。

そのために、8 極 12 スロットの表面磁石型同期モータ (SPMSM : Surface Permanent Magnet Synchronous Motor)、ステータ 6 極、ロータ 4 極の 3 相 SRM、および 12 極 18 スロットの分割コアタイプ埋込磁石型同期モータ (IPMSM : Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) の特性に及ぼす無方向性電磁鋼板の磁気特性の影響を検討する。そして、モータの基本周波数が約 100Hz 程度であっても、モータ効率とモータ鉄損は従来の素材鉄損指標である $W_{15/50}$ ではなく、磁束密度 1.0T、周波数 400Hz 時の素材鉄損 $W_{10/400}$ と非常に良い相関を示すことを明らかにし、PMSM と SRM では鉄心材料選択時の指標として $W_{10/400}$ が良いことを提案する。さらに、その確証のため有限要素法による磁界解析に基づくモータ鉄損の計算を行い、測定値との比較と検証を行う。

また、従来材料より磁束密度を高めた無方向性電磁鋼板 (JNP シリーズ) を用いて、3 相誘導モータでの評価を行う。これにより、新規開発材は、高磁束密度設計のモータおよび小型化や高トルクが要求されるモータに有利に適用できることを示す。

さらに、エンジン回転数 3000min^{-1} 以下でのトルクアシストを目的にした HEV 用モータである 22 極 24 スロット PMSM と 24 極 36 スロット PMSM の損失解析を行い、鉄損低減には前者の方が有利であり、また、特に前者で問題となる磁石部渦電流損の低減には、1 個の磁石を周方向に分割するのが効果的であることを提案する。

第 1 章では、研究の背景や目的とともに、本論文の概要を述べる。

第 2 章では、8 極 12 スロット SPMSM の特性に及ぼす無方向性電磁鋼板の影響を、ステータ用材料に種々の電磁鋼板を用いて検討する。その結果、モータ効率とモータ鉄損は素材

鉄損 $W_{10/400}$ と非常に良い相関にあることを示す。その一因として、磁束微分波形に高調波が強く重畳していることが考えられ、磁界解析計算によってその理由を説明する。また、素材磁束密度 B_{50} はモータ銅損に影響するが、モータ効率への影響は素材鉄損が支配的であり、磁束密度の影響は小さいことを示す。

第 3 章では、新規高磁束密度材の磁気特性を示し、3 相誘導モータに適用した結果から、新規開発材は既存の高磁束密度材に比べて動作磁束密度が $1.6T$ 以上の場合にモータ効率改善量が大きいことを示し、両者の磁束密度と磁界の強さの関係から、その理由を明らかにする。また、駆動周波数を変更した結果から、モータの銅損比率が 80% 以上の場合、低 Si 量の開発材の方が、高 Si 量の開発材よりモータ効率は有利になることを示す。

第 4 章では、ステータ 6 極、ロータ 4 極の 3 相 SRM の特性に及ぼす無方向性電磁鋼板の影響を検討する。ステータとロータに同一材料を用いて検討した結果、SRM は誘導モータに類似して銅損比率が高いにもかかわらず、モータ効率への影響は素材鉄損が支配的であり、モータ効率とモータ鉄損は $W_{15/50}$ よりも $W_{10/400}$ と良い相関を呈することを示す。

また、SRM ではモータの各部において磁束密度波形が大きく異なり、かつ、高調波を多く含む複雑な波形をしているため、モータ鉄損を簡便かつ精度良く求める手法は十分に確立していない。ここでは、モータ各部を磁束密度波形パターンによって分類し、その特徴に応じて異なる鉄損算出式を用いる方法を提案する。

第 5 章では、12 極 18 スロットの分割コア IPMSM の特性に及ぼす無方向性電磁鋼板の影響を、ステータのティース径方向を素材の圧延方向に揃えて検討する。モータ効率は、モータ鉄損を介して素材鉄損 $W_{10/400}$ によってほぼ決定されており、さらに、ヨーク周方向よりもティース径方向の磁気特性を改善した方がモータ特性の改善量が大きいことを示す。

また、モータ鉄損の計算値と実測値の乖離の一因として、通常の磁気特性評価法で使用する幅 $30mm$ 、長さ $280mm$ のエプスタイン試験片と、実際のモータ形状の違いが考えられる。ここでは、モータのティースやヨーク幅とほぼ同等幅 ($10, 5mm$) にせん断した試験片を測定して得た素材の磁気特性を用いてモータ鉄損を計算し、実測値とほぼ等しい値が得られることを示す。

第 6 章では、最大出力が必要な $1700min^{-1}$ 時に同一電流で同一トルクを得るという条件で設計した 22 極 24 スロット PMSM と 24 極 36 スロット PMSM のモータ損失を検討する。無負荷 $6000min^{-1}$ での鉄損は、前者の方が極数が少なく駆動周波数が低いために小さい。一方、負荷時の磁石部渦電流損は前者の方が大きいですが、磁石を周方向に分割することで渦電流損は効果的に減少できる。後者でも過度の温度上昇を防ぐには磁石を周方向に 2 分割以上する必要があるため、モータ損失低減の観点から、前者の採用が適当であることを示す。

第 7 章では、結論として以上の章の総括を行う。

審査結果の要旨

本論文は、モータの小形軽量化や高効率化に大きな影響を及ぼす重要な軟磁性材料である無方向性電磁鋼板の磁気特性が、各種モータの特性に及ぼす影響について研究したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 8 極 12 スロット SPMSM の特性に及ぼす無方向性電磁鋼板の影響を検討した結果、モータ効率とモータ鉄損は素材鉄損 $W_{10/400}$ と非常に良い相関にあることを明らかにした。また、素材磁束密度 B_{50} はモータ銅損に影響するが、モータ効率への影響は素材鉄損が支配的であることを明らかにした。

- (2) 新規高磁束密度材を 3 相誘導モータに適用した結果から、新規開発材は動作磁束密度が 1.6T 以上の場合に効率改善効果が大きいこと、モータの銅損比率が 80%以上の場合、低 Si 材の方がモータ効率は有利になることを明らかにした。
- (3) 3 相 SRM の特性に及ぼす無方向性電磁鋼板の影響を検討した結果、効率への影響は素材鉄損が支配的であり、モータ効率とモータ鉄損は $W_{10/400}$ と良い相関を示すことを明らかにした。また、モータ鉄損を簡便かつ精度良く求める方法を提案した。
- (4) 12 極 18 スロットの分割コア IPMSM の特性に及ぼす無方向性電磁鋼板の影響を検討し、モータ効率は、素材鉄損 $W_{10/400}$ によってほぼ決定されること、ヨーク周方向よりもティース径方向の磁気特性を改善した方がモータ特性の改善量が大きいことを明らかにした。
- (5) ハイブリッド自動車用モータとして、22 極 24 スロット PMSM と 24 極 36 スロット PMSM の鉄損および磁石部渦電流損について検討した結果、モータ損失低減の観点から、22 極 24 スロット PMSM の採用が適当であることを明らかにした。

以上の諸成果は、各種モータの鉄心材料選択時に最適な磁気特性指標を提案するとともに、その理由の明確化を行ったものであり、各種モータの高性能化と省エネルギー・高効率化に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。