

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5186036号
(P5186036)

(45) 発行日 平成25年4月17日 (2013. 4. 17)

(24) 登録日 平成25年1月25日 (2013. 1. 25)

(51) Int. Cl. F I
H O 2 K 1/27 (2006. 01) H O 2 K 1/27 5 O 1 K
H O 2 K 1/22 (2006. 01) H O 2 K 1/27 5 O 1 M
H O 2 K 1/22 A

請求項の数 6 (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願2011-264671 (P2011-264671)	(73) 特許権者	000004581
(22) 出願日	平成23年12月2日 (2011. 12. 2)		日新製鋼株式会社
(65) 公開番号	特開2012-217318 (P2012-217318A)		東京都千代田区丸の内3丁目4番1号
(43) 公開日	平成24年11月8日 (2012. 11. 8)	(74) 代理人	100110423
審査請求日	平成24年10月1日 (2012. 10. 1)		弁理士 曾我 道治
(31) 優先権主張番号	特願2011-81214 (P2011-81214)	(74) 代理人	100111648
(32) 優先日	平成23年3月31日 (2011. 3. 31)		弁理士 梶並 順
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)	(74) 代理人	100147500
(31) 優先権主張番号	特願2011-81215 (P2011-81215)		弁理士 田口 雅啓
(32) 優先日	平成23年3月31日 (2011. 3. 31)	(72) 発明者	岩津 智永
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		広島県呉市昭和町11番1号 日新製鋼株式会社内
早期審査対象出願		(72) 発明者	片桐 幸男
			広島県呉市昭和町11番1号 日新製鋼株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 I P Mモータの回転子及びそれを用いた I P Mモータ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

回転速度が所定値を超えた際に弱め界磁制御が行われる I P Mモータに組み込まれる I P Mモータの回転子であって、

磁界の強さが 8000 A/m である時の磁束密度 B 8000 の値が 1.65 T 以上であるとともに、保磁力が 100 A/m 以上の素材鋼板が積層されることにより形成された回転子鉄心と、

前記回転子鉄心の周方向に互いに間隔をおいて前記回転子鉄心に設けられた複数の永久磁石挿入孔と、

各永久磁石挿入孔に埋め込まれた永久磁石と
を備えていることを特徴とする I P Mモータの回転子。

【請求項 2】

前記素材鋼板の保磁力は 300 A/m 以上であることを特徴とする請求項 1 記載の I P Mモータの回転子。

【請求項 3】

前記素材鋼板の降伏強度は 750 N/mm^2 以上であることを特徴とする請求項 1 又は請求項 2 に記載の I P Mモータの回転子。

【請求項 4】

前記素材鋼板の降伏強度は 950 N/mm^2 以上であることを特徴とする請求項 1 又は請求項 2 に記載の I P Mモータの回転子。

【請求項 5】

前記素材鋼板の降伏強度は 1300 N/mm^2 以上であることを特徴とする請求項 1 又は請求項 2 に記載の IPM モータの回転子。

【請求項 6】

回転速度が所定値を超えた際に弱め界磁制御が行われる IPM モータであって、請求項 1 から請求項 5 までのいずれか 1 項に記載の回転子が組み込まれていることを特徴とする IPM モータ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、例えば電気自動車、ハイブリッド自動車、及び工作機械等に使用される永久磁石埋め込み型モータ（以下「IPM モータ」と記す）の回転子、及びそれを用いた IPM モータに関する。

【背景技術】

【0002】

一般に、IPM モータは、高価な永久磁石を使用するためコストは高くなるものの、誘導電動機と比べて効率が低い。このため、IPM モータは、例えば、ハイブリッド自動車及び電気自動車の駆動用モータ及び発電用モータ、家電製品、並びに各種の工作機械や産業機械用のモータ等に広く使用されている。

【0003】

IPM モータの鉄心は、固定子と回転子とに分けられる。固定子側の鉄心には巻線を通じて交流磁界が直接付与されるので、効率を高くするために、固定子側の鉄心には、高透磁率であると同時に体積抵抗率を高めて、鉄損を低減できることが要求される。このため、固定子側の鉄心には、極低炭素鋼に Si を添加して軟磁気特性を改善した電磁鋼板が用いられる。

【0004】

一方、回転子側の鉄心には永久磁石が埋め込まれるため、回転子側の鉄心は、主にヨークとして磁束密度を高める役割を担う。回転子側の鉄心は固定子側から発生する交流磁界の影響を僅かに受けるが、その影響は限定的である。従って、特性の観点から見ると、鉄損特性に有利な電磁鋼板を回転子側の鉄心に使用する必要はない。しかし、固定子のみに電磁鋼板を使用すると電磁鋼板の製品歩留りが低下して、モータの製造コストが高くなるので、通常は、回転子側の鉄心にも固定子側と同じ電磁鋼板が用いられる。

【0005】

IPM モータが自動車に搭載される場合、自動車の小型軽量化のニーズから IPM モータにも小型化が求められる。その場合、小型化しても従来と同等以上のモータ出力（トルク）を得るために、回転子の回転数が高められる。一般に、モータの効率は回転子の回転速度を高くするほど良好となる。しかし、IPM モータでは、埋め込まれた永久磁石の回転により、固定子巻線に誘導起電力が発生する。この誘導起電力は、回転速度の上昇に伴い増加する。そして、誘導起電力が入力電圧を超えたところで、モータは回転できなくなる。

【0006】

このため IPM モータでは、例えば特許文献 1 等に示されるように、高速回転域で運転する際に、永久磁石の磁束を打ち消す方向の磁束を固定子側から発生させ、誘導起電力を抑制する弱め界磁制御が行われている。この弱め界磁制御により、高速回転域での運転が可能となる反面、永久磁石の磁束を打ち消すために電力を使用するため、モータトルクは減少する。なお、特許文献 1 では、磁石の形状に工夫を施すことにより、弱め界磁制御に使用する電力量を少なくすることが図られている。

【0007】

一方、IPM モータを小型化しても従来と同等以上のトルクを得るため回転子の回転数を高めると、回転子に埋め込まれた永久磁石に作用する遠心力が増大して回転子の破損に

10

20

30

40

50

いたる問題がある。破損を起こさないためには、回転子の素材として降伏強度が高い材料が好適である。例えば3%程度のSiを含有する無方向性電磁鋼板(35A300)の場合、磁性焼鈍後の降伏強度は約400N/mm²程度である。このため、回転子の直径が80mm以上の比較的大型のIPMモータの場合、回転子の構造によって異なるものの、2000rpm程度が破損を起こさない回転速度の限界と考えられている。これまでも、電磁鋼板をベースに鉄心の降伏強度を高くする検討が種々行われてきたが、それでも高々780N/mm²程度である。

このように、IPMモータの小型化にあたり高速回転化してトルクを得ようとする場合、従来の電磁鋼板を素材とする回転子鉄心では、高速回転域では弱め界磁制御を行ってもトルクが減少してしまう問題と、永久磁石に作用する遠心力により回転子が破損する問題とがあり、高速回転化に限界があった。

10

【0008】

高速回転化による回転子鉄心の破損を抑制する方法として、例えば下記の特許文献2等では、回転子鉄心の素材として軟質かつ焼入れ性を有する材料を用い、永久磁石の挿入孔が近接したブリッジ部やその近傍部分のみに部分焼入れを施すことによって強度を上昇させることが提案されている。また、例えば下記の特許文献3等では、回転子鉄心用素材として、電磁鋼板ではなく、高強度かつ高飽和磁束密度である材料を用いることも提案されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

20

【0009】

【特許文献1】特開2000-278900号公報

【特許文献2】特開2009-153230号公報

【特許文献3】特開2009-46738号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

本願発明者らは、高速回転用の回転子用鋼板の開発を行う中で、種々の鋼板を素材としてIPMモータを試作し、モータの性能評価を行った結果、素材鋼板の保磁力を調節することにより、弱め界磁制御を行う高速回転域で大きな出力トルクが得られることを見出した。より大きな出力トルクが得られることで、より高い回転数まで回転子を回転できる。

30

【0011】

特許文献1では、磁石の形状に工夫を施すことにより、弱め界磁制御に使用する電力量を少なくすることが図られているが、素材鋼板の保磁力を調節する点については考慮されていない。また、特許文献2, 3においても、素材鋼板の保磁力を調節する点については考慮されていない。すなわち、従来構成では、素材鋼板の保磁力を調節する点について考慮されていないため、高回転域での出力トルクが小さくなっており、それに伴い最大回転数も低くなっている。

【0012】

本発明は、上記のような課題を解決するためになされたものであり、その目的は、高回転域での出力トルクをより大きくでき、最大回転数をより高くできるIPMモータの回転子及びIPMモータを提供することである。

40

【課題を解決するための手段】

【0013】

本発明に係るIPMモータの回転子は、回転速度が所定値を超えた際に弱め界磁制御が行われるIPMモータに組み込まれるIPMモータの回転子であって、磁界の強さが8000A/mである時の磁束密度B8000の値が1.65T以上であるとともに、保磁力が100A/m以上の素材鋼板が積層されることにより形成された回転子鉄心と、回転子鉄心の周方向に互いに間隔をおいて回転子鉄心に設けられた複数の永久磁石挿入孔と、各永久磁石挿入孔に埋め込まれた永久磁石とを備える。

50

【 0 0 1 4 】

また、本発明に係る I P M モータは、回転速度が所定値を超えた際に弱め界磁制御が行われる I P M モータであって、前述の回転子が組み込まれている。

【 発明の効果 】

【 0 0 1 5 】

本発明の I P M モータの回転子によれば、磁界の強さが 8000 A/m である時の磁束密度 $B8000$ の値が 1.65 T 以上であるとともに、保磁力が 100 A/m 以上の素材鋼板が積層されることにより形成された回転子鉄心が用いられているので、高回転域での出力トルクをより大きくでき、最大回転数をより高くできる。

また、本発明の I P M モータによれば、前述の回転子を用いているので、同様に、高回転域での出力トルクをより大きくでき、最大回転数をより高くできる。

さらに、本発明の I P M モータの回転子は、 750 N/mm^2 以上の降伏強度を有する素材鋼板が積層されることにより形成されているので、回転子を高速回転しても永久磁石に作用する遠心力により回転子が破損することがない。そのため、永久磁石挿入孔の周囲に設けられるブリッジ部の幅を狭くすることができる。ブリッジ幅を狭くできれば漏れ磁束を効果的に低減できるので、回転子の設計自由度が高まる。また、永久磁石を小型化してもよいので、モータのコストを大幅に低減できる。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 1 6 】

【 図 1 】 本発明の実施の形態による I P M モータの回転子を示す正面図である。

【 図 2 】 図 1 の回転子とは別の I P M モータの回転子を示す正面図である。

【 図 3 】 素材鋼板の評価に用いた第 1 回転子を示す説明図である。

【 図 4 】 素材鋼板を用いた I P M モータでの 15000 rpm における最大トルクと保磁力との関係を示すグラフである。

【 図 5 】 素材鋼板を用いた I P M モータでの 15000 rpm における効率と保磁力との関係を示すグラフである。

【 図 6 】 素材鋼板の評価に用いた第 2 回転子を示す説明図である。

【 発明を実施するための形態 】

【 0 0 1 7 】

以下、本発明を実施するための形態について、図面を参照して説明する。

図 1 は、本発明の実施の形態による I P M モータの回転子を示す正面図である。図に示すように、I P M モータの回転子 1 には、後述の回転子用鋼板（素材鋼板）が積層されることにより形成された回転子鉄心 10（回転子本体）と、回転子鉄心 10 の周方向に沿って互いに間隔を置いて回転子鉄心 10 に設けられた複数の永久磁石挿入孔 11 と、各永久磁石挿入孔 11 に埋め込まれた永久磁石 12 とが含まれている。なお、回転子 1 の外周に図示しない固定子が配置されることで、I P M モータが構成される。

【 0 0 1 8 】

各永久磁石挿入孔 11 には、回転子鉄心 10 の回転中心 10a 側を頂部とするように V 字状に配置された第 1 及び第 2 挿入孔 11a, 11b と、その頂部において第 1 及び第 2 挿入孔 11a, 11b 間を仕切るブリッジ 11c とが含まれている。永久磁石 12 は、第 1 及び第 2 挿入孔 11a, 11b 内にそれぞれ埋め込まれている。すなわち、永久磁石挿入孔 11 に 2 つの永久磁石 12 が埋め込まれている。

【 0 0 1 9 】

次に、図 2 は、図 1 の I P M モータの回転子とは別の I P M モータの回転子 2 を示す正面図である。なお、図 1 の回転子 1 に含まれる構成と同じ又は同様の構成には同じ符号を付して説明する。図 2 に示すように、回転子 2 には、回転子鉄心 10 と、回転子鉄心 10 の周方向に沿って互いに間隔を置いて回転子鉄心 10 に設けられ複数の永久磁石挿入孔 20 と、各永久磁石挿入孔 20 に埋め込まれた永久磁石 21 とが含まれている。回転子鉄心 10 は、図 1 の回転子 1 の回転子鉄心 10 と同様に、後述の素材鋼板が積層されることで形成されたものである。

【0020】

各永久磁石挿入孔20は、回転子鉄心10の周方向に沿って90°間隔で配置されている。各永久磁石挿入孔20はそれぞれ直線状に形成されており、各永久磁石挿入孔20に対して1つの永久磁石21が埋め込まれている。

【0021】

図1及び図2に示すような回転子1, 2を用いたIPMモータでは、周知のように、高速回転域で運転する際に、永久磁石12の磁束を打ち消す方向の磁束を固定子側から発生させ、誘導起電力を抑制する弱め界磁制御が行われる。このようなIPMモータの定格回転速度は、図1の回転子1を用いた場合には7500rpmとされ、図2の回転子2を用いた場合には10000rpmとされる。上述の弱め界磁制御は、これらの回転速度を超える高速回転域で行われる。

10

【0022】

回転子鉄心10は、磁界の強さが8000A/mである時の磁束密度B8000の値が1.65T以上であるとともに、保磁力が100A/m以上の素材鋼板が積層されることで形成される。

【0023】

磁束密度B8000の値が1.65T以上とされているのは、回転子1として高速回転する際に永久磁石12を挿入した位置(d軸)と挿入していない位置(q軸)でのインダクタンスの値の差に基づくリラクタンストルクを有効に活用し、とくに高速回転領域において従来の鋼板と同等以上のトルク性能を発揮するためである。

20

【0024】

保磁力が100A/m以上とされているのは、以下の通りである。一般に、モータの入力電流を高くすると、出力トルクは増加する。しかしながら、例えば「東京学芸大学工学部紀要、Vol. 27 No. 1 (2004)、P126~132」のように、IPMモータでは鉄心材の磁気飽和の影響を受けるため、入力電流が高くなると、q軸インダクタンスが低下して、リラクタンストルクが低下することが知られている。すなわち、電磁鋼板などの保磁力の小さな鋼板では、容易に磁気飽和を生じるため、入力電流を増加させても直ぐにリラクタンストルクが上昇できなくなるのに対して、保磁力が大きな鋼板を素材鋼板とした場合には、磁気飽和が生じにくいいため、比較的高い入力電流値までリラクタンストルクの低下が抑制される。その結果として、出力トルク及び効率を向上できるものと考えられる。本願発明者らが種々の鋼板を素材としてIPMモータを試作し、モータの性能評価を行ったところ、100A/m以上の保磁力を有する素材鋼板を用いて回転子鉄心10を形成することで、高速回転時に行う弱め界磁制御の消費電力を低減でき、出力トルクを向上できることを見出した。但し、保磁力が大きくなると、磁束密度が低くなる傾向が認められ、磁束密度B8000の値が1.65T未満となる場合には十分なリラクタンストルクが得られなくなる。

30

【0025】

回転子鉄心10の素材鋼板は、降伏強度が750N/mm²以上であることが好ましい。降伏強度をこのような範囲とすることで、回転子鉄心10が高速回転時に永久磁石12に作用する遠心力に耐えることができ、高速回転域においても回転子が破損することがない。しかも本発明の回転子鉄心10は、その素材鋼板が弱め界磁制御性に優れた鋼板であることにより高速回転域においてもトルクの低下が抑制されるため、高速回転と高トルクが得られる高性能のモータを提供できる。これにより、自動車・家電をはじめ各種用途への適用が可能となる。

40

図1の回転子1の各永久磁石挿入孔11に設けられたブリッジ11cは、各永久磁石挿入孔11周辺の強度を確保するためのものである。素材鋼板自体に十分な強度を持たせることでブリッジ11cの幅(第1及び第2挿入孔11a, 11bの離間方向に沿うブリッジ11cの幅)を小さくすることができ、それにより漏れ磁束を少なくできる。回転子鉄心の強度を高めることでブリッジ11cの幅を小さくしても回転子が破損せず漏れ磁束も低減できるのであれば、回転子の設計自由度が高まる。また漏れ磁束の低減により永久磁

50

石 1 2 を小型化してもよいので、モータのコストを大幅に低減できる。また永久磁石 1 2 を小さくせずに出力トルクの向上を図ることも可能となる。高速回転が可能になることによる高トルク化と永久磁石の小型化の両者を勘案してブリッジ幅を設計してもよい。

なお、回転子鉄心 1 0 の素材鋼板の降伏強度の上限は、 2000 N/mm^2 である。これは、 2000 N/mm^2 を超える降伏強度を呈する材料では、磁界の強さが 8000 A/m である時の磁束密度 $B8000$ の値が 1.65 T 以上得られないためである。

【実施例】

【0026】

本発明者らは、表 1 に示す成分組成を有する鋼を素材として、下記の製造方法 A により回転子鉄心 1 0 の素材鋼板を製造した。

10

製造方法 A

表 1 に示す成分組成を有する鋼を真空溶解し、これらの連铸片を 1250 に加熱し、 950 で仕上げ圧延して 560 で巻取り、板厚 1.8 mm の熱間圧延鋼板を得た。これらの熱間圧延鋼板を酸洗した後、一回の冷間圧延にて板厚 0.35 mm の冷間圧延鋼帯を得た（最終圧延率：約 81% ）。得られた冷間圧延鋼帯を 400 に設定した連続炉に 60 秒通板してテンションアニリング処理（引張張力 100 N/mm^2 ）を施した。また、その後、Cr 系酸化物及び Mg 系酸化物を含有する半有機組成の約 $1\text{ }\mu\text{m}$ の厚さの絶縁皮膜を鋼板の両面に形成した。

【0027】

【表 1】

20

供試材の成分組成

鋼 No.	C	Si	Mn	P	S	sol.Al	Si+ sol.Al	Ti,Nb,V	Mo,Cr,Cu, Ni,B
1	0.0005	0.22	0.24	0.013	0.005	0.02	0.24	0.039	B:0.002
2	0.0018	0.46	1.36	0.016	0.004	0.02	0.48	—	—
3	0.011	0.24	0.65	0.023	0.004	0.04	0.28	—	—
4	0.057	0.002	2.44	0.035	0.008	0.03	0.03	—	—
5	0.221	0.20	0.92	0.016	0.003	0.03	0.23	Ti:0.015	B:0.003
6	0.822	0.23	0.46	0.013	0.010	0.005	0.24	—	—
7	1.202	0.82	0.48	0.012	0.009	0.05	0.87	—	—
8	0.201	0.45	0.62	0.087	0.009	0.07	0.52	—	—
9	0.064	0.30	2.07	0.017	0.004	0.024	0.32	Ti:0.038 Nb:0.022	Cu:0.05

30

【0028】

製造方法 A で製造した素材鋼板の評価

得られた鋼帯から JIS 5 号試験片を切り出し、引張試験に供した。また、内径 33 mm 及び外形 45 mm のリング状の試験片を打抜きにより作製し、磁化測定に供した。各サンプルの降伏強さ、引張強さ、降伏比（YR）、磁界の強さが 8000 A/m のときの磁束密度（ B_{8000} ）と保磁力（Hc）を表 2 に示す。

40

【0029】

【表 2】

製造方法Aによる素材鋼板の各種特性

鋼 No.	降伏強さ (N・mm ⁻²)	引張強さ (N・mm ⁻²)	YR (%)	B ₈₀₀₀ (T)	保磁力 H _c (A/m)	備考
1	620	651	95	1.84	696	本発明例
2	749	776	97	1.81	798	本発明例
3	672	693	97	1.84	775	本発明例
4	999	1024	98	1.81	1021	本発明例
5	928	961	97	1.75	978	本発明例
6	981	1033	95	1.65	1065	本発明例
8	907	944	96	1.75	1004	本発明例
9	997	1048	95	1.75	1165	本発明例

10

【0030】

また、本発明者らは、表1に示す成分組成を有する鋼を素材として、下記の製造方法Bにより回転子10の素材鋼板を製造した。

20

製造方法B

表1に示す成分組成を有する鋼を溶解して、これらの連铸片を1250に加熱し、850で仕上げ圧延して560で巻取り、板厚1.8mmの熱延鋼板を得た。この熱延鋼板を酸洗後、冷間圧延して板厚0.35mmの冷延鋼板を得た。得られた冷延鋼板を、900まで加熱し、250に設定したPb-Bi合金浴中へ通板して、100/sの平均冷却速度で250まで冷却し、引き続き400に設定した電気炉中に60s保持しつつ、プレステンパーを施した。その後、Cr系酸化物およびMg系酸化物を含有する半有機組成の約1μmの厚さの絶縁皮膜を鋼板の両面に塗布した。

【0031】

製造方法Bで製造した素材鋼板の評価

30

製造方法Bで製造した素材鋼板に対して、上述の製造方法Aで製造した素材鋼板と同様の試験を行った。その結果を表3に示す。

【0032】

【表 3】

製造方法Bによる素材鋼板の各種特性

鋼 No.	降伏強さ (N・mm ⁻²)	引張強さ (N・mm ⁻²)	YR (%)	B ₈₀₀₀ (T)	保磁力 H _c (A/m)	備考
1	249	346	72	1.89	254	本発明例
2	314	393	80	1.86	469	本発明例
3	364	460	79	1.86	731	本発明例
4	767	919	83	1.80	1012	本発明例
5	893	1092	82	1.77	1133	本発明例
6	1315	1467	90	1.76	1893	本発明例
7	1703	1941	88	<u>1.61</u>	2675	比較例
8	1123	1206	93	1.76	1324	本発明例
9	829	921	90	1.73	1016	本発明例

下線は、本発明で規定した条件を外れることを示す。

【0033】

さらに、本発明者らは、表1に示す成分組成を有する鋼を素材として、下記の製造方法Cにより回転子10の素材鋼板を製造した。

製造方法C

表1に示す成分組成を有する鋼の内、No. 1, 2, 3, 4, 5の連铸片を製造方法Aと同様にして1250 に加熱し、950 で仕上げ圧延して560 で巻取り、板厚1.8mmの熱間圧延鋼板を得た。これらの熱間圧延鋼板を酸洗した後、一回の冷間圧延にて板厚0.35mmの冷間圧延鋼帯を得た（最終圧延率：約81%）。得られた冷間圧延鋼帯を800 に設定した連続炉に60秒通板する再結晶焼鈍を施した。なお、冷却は8 / sで550 まで冷却後、450 に設定した連続炉中に120s以上保持する過時効処理を施した。その後、0.3%の伸び率の軽冷延を行い、更にCr系酸化物及びMg系酸化物を含有する半有機組成の約1μmの厚さの絶縁皮膜を鋼板の両面に形成した。

【0034】

製造方法Cで製造した素材鋼板の評価

製造方法Cで製造した素材鋼板に対して、上述の製造方法A, Bで製造した素材鋼板と同様の試験を行った。その結果を表4に示す。

【0035】

10

20

30

【表 4】

製造方法Cによる素材鋼板の各種特性

鋼 No.	降伏強さ ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	引張強さ ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	YR (%)	B_{8000} (T)	保磁力 H_c (A/m)	備考
1	203	267	76	1.89	<u>58</u>	比較例
2	288	369	78	1.87	<u>97</u>	比較例
3	290	358	81	1.87	<u>83</u>	比較例
4	456	532	86	1.81	124	本発明例
5	393	447	88	1.77	145	本発明例

下線は、本発明で規定した条件を外れることを示す。

【 0 0 3 6 】

I P M モータとしての評価（磁束密度と保磁力について）

表 5 に示すように、製造方法 A で製造した No. 1 鋼、No. 3 鋼、No. 5 鋼および No. 9 鋼、製造方法 B で製造した No. 1 鋼、No. 2 鋼、No. 4 鋼、No. 6 鋼および No. 7 鋼、更には製造方法 C で製造した No. 1 鋼、No. 2 鋼、No. 4 鋼および No. 5 鋼について、図 3 に示す 8 極（4 極対）構造の第 1 回転子を打抜き加工により作製し、負荷トルクを付与したモータ性能評価試験に供した。なお、比較のため市販の電磁鋼板（35A300）を素材とした回転子も同時に作製し、同様の評価に供した。また、固定子は 1 ケのみ製造し、製造した回転子を組替えてモータとしての性能評価に供した。モータの最大出力はいずれも 4.5 kW である。また、この性能評価では、10000 rpm 以上で弱め界磁制御を行った。

なお、市販の電磁鋼板（35A300）について、本発明の素材鋼板と同様の方法による機械的特性と磁気的特性を評価したところ、次のとおりであった。

板厚 0.35 mm

降伏強さ 381 N/mm^2

引張強さ 511 N/mm^2

飽和磁束密度 B_{8000} 1.76 T

保磁力 75 A/m

【 0 0 3 7 】

10

20

30

【表 5】

IPMモータとしての評価(磁束密度と保磁力)

製造方法	鋼 No.	B_{8000} (T)	H_c (A/m)	15000rpm でのモータ性能		備考
				トルク (N・m)	効率 (%)	
—	電磁鋼板 35A300	1.76	<u>75</u>	1.5	45	比較例
A	1	1.84	696	2.6	77	本発明例
	3	1.84	775	2.7	80	本発明例
	5	1.75	978	2.6	77	本発明例
	9	1.75	1165	2.7	80	本発明例
B	1	1.89	254	2.2	65	本発明例
	2	1.86	469	2.6	77	本発明例
	4	1.80	1012	2.8	83	本発明例
	6	1.76	1893	3.1	92	本発明例
	7	<u>1.61</u>	2675	1.7	51	比較例
C	1	1.89	<u>58</u>	1.7	51	比較例
	2	1.87	<u>97</u>	1.8	54	比較例
	4	1.81	124	2.1	62	本発明例
	5	1.77	145	2.2	65	本発明例

下線は、本発明で規定した条件を外れることを示す。

【0038】

作製した回転子および固定子の仕様は以下の通りである。

第1回転子の仕様

外径：80.1mm、軸長50mm

・積層枚数：0.35mm/140枚

・センターブリッジ、アウトブリッジの幅：1.00mm

・永久磁石：ネオジウム磁石（NEOMAX-38VH）、9.0mm幅×3.0mm厚×50mm長さ、合計16ヶ埋め込み

固定子の仕様

・ギャップ長：0.5mm

・外径：138.0mm、ヨーク厚：10mm、長さ：50mm

・鉄心素材：電磁鋼板（35A300）、板厚0.35mm

・積層枚数：140枚

・巻線方式：分布巻き

【0039】

それぞれの第1回転子を組込んだときの15000rpmにおけるモータの最大トルクと効率を表5に合わせて示した。また、図4に15000rpmにおける最大トルクと保磁力との関係を示すとともに、図5に15000rpmにおける効率と保磁力との関係を示す。また、この性能評価でも、10000rpm以上で弱め界磁制御を行った。

【0040】

表5、図4、図5の結果から明らかなように、保磁力 H_c が100A/m未満の鋼板（電磁鋼板、並びに製造方法Cで製造したNo.1鋼及びNo.2鋼）を回転子鉄心の素材とした回転子を組込んだモータでは、15000rpmにおけるトルクが2.0N・m未満の低い値を示し、効率も60%未満の低い値を示した。これに対して、本願発明範囲の

10

20

30

40

50

磁束密度と保磁力を有する素材鋼板を回転子鉄心としたモータでは $2.0 \text{ N} \cdot \text{m}$ を超える高いトルクと 60% 以上の良好な効率が得られる。とくに保磁力が 300 A/m 以上の領域では、 $2.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 以上と更に高いトルクと 70% 以上の高い効率が得られる。

一方、高保磁力を有するものの磁束密度 B が 1.61 T と低い製造方法 B による No. 7 鋼では、磁束密度が低いことに起因してトルク及び効率が低くなる。

【0041】

IPMモータとしての評価（ブリッジ幅と強度について）

本発明者らは、製造方法 B で製造した No. 4 鋼（降伏強度が 750 N/mm^2 を超えるもの）及び No. 6 鋼（最も降伏強度が高かったもの）（以下、これらを超高強度鋼板と呼ぶ）を用いて、図 6 に示す第 2 回転子をさらに作製した。図 6 の第 2 回転子は、図 3 の第 1 回転子と比べてブリッジ幅を $1/2$ に狭くして漏れ磁束を低減させ、永久磁石の大きさを幅 9.0 mm から幅 8.0 mm とした（約 11% 小型化）したものである。また、 10000 rpm 以上で弱め界磁制御を行った。

【0042】

第 2 回転子の仕様は以下の通りである。なお、固定子については上記の磁束密度等の評価に用いたものを利用した。

第 2 回転子の仕様

外径： 80.1 mm 、軸長 50 mm

・積層枚数： $0.35 \text{ mm}/140$ 枚

・センターブリッジ、アウターブリッジの幅： 0.5 mm

・永久磁石：ネオジム磁石（NEOMAX-38VH）、 8.0 mm 幅 \times 3.0 mm 厚 \times 50 mm 長さ、合計 16ヶ埋め込み

【0043】

また、比較のため、電磁鋼板を用いて第 1 及び第 2 回転子を作製した。電磁鋼板と製造方法 B で製造した No. 6 鋼を素材とした回転子を用いた IPM モータの 5000 rpm ~ 15000 rpm までの最大トルクおよび効率を表 6 に示す。

【0044】

【表 6】

IPMモータとしての評価（ブリッジ幅）

回転子 鉄心	回転子	5000rpm		7500rpm		10000rpm		15000rpm	
		最大トルク ($\text{N} \cdot \text{m}$)	モータ効率 (%)	最大トルク ($\text{N} \cdot \text{m}$)	モータ効率 (%)	最大トルク ($\text{N} \cdot \text{m}$)	モータ効率 (%)	最大トルク ($\text{N} \cdot \text{m}$)	モータ効率 (%)
電磁鋼板 35A300	第1回転子	5.4	80	5.4	80	4.7	93	1.5	45
	第2回転子	5.4	80	5.4	80	4.6	91	1.6	48
製造方法B No.6	第1回転子	5.5	82	5.5	82	4.9	96	3.1	92
	第2回転子	5.5	81	5.5	82	4.8	95	3.0	89

【0045】

表 6 に示すように、超高強度鋼板を回転子鉄心の素材に用いると、第 2 回転子のようにブリッジの幅を狭くしても、また、永久磁石を小型化したにも拘わらず、電磁鋼板を鉄心素材とした回転子と同等以上のモータ性能を有するロータが得られることがわかる。特に 10000 rpm を超える高速回転域では、保磁力に起因する弱め界磁性の向上により高トルクの良好な特性が得られることがわかる。

【0046】

また、上記試験に用いた回転子を固定子から取り外して鋼製カバーを取り付けた状態とし、変速機を介して負荷モータへ接続して負荷モータ側から駆動させることによって、 50000 rpm までの過回転試験を行い回転子が遠心力により破壊する回転速度を調べた。その結果を表 7 に示す。

【0047】

【表 7】

IPMモータとしての評価(強度)

回転子鉄心	電磁鋼板/35A300		超高強度鋼板					
			製造方法A・No.6		製造方法B・No.4		製造方法B・No.6	
回転子	第1回転子	第2回転子	第1回転子	第2回転子	第1回転子	第2回転子	第1回転子	第2回転子
破断時の 回転数	30450	25500	49000	42000	43200	36000	≥50000 (破断無し)	45300

【0048】

表7に示すように、回転子素材として電磁鋼板を用い、ブリッジ幅が1.0mmである第1回転子では、30450rpmで回転子が破壊した。これに対して、降伏強度が750N/mm²以上の超高強度鋼板である製造方法BのNo.4鋼を回転子素材として用いた場合、第1回転子では43200rpmまで破断せず、ブリッジ幅を0.5mmに狭くした第2回転子でも電磁鋼板の第1回転子と同等以上の36000rpmまで破断しなかった。降伏強度が950N/mm²以上である製造方法AのNo.6鋼では、ブリッジ幅が0.5mmの第2回転子の場合、42000rpmまで破断せず、降伏強度が1300N/mm²以上である製造方法BのNo.6鋼では、第1回転子の場合、50000rpmでも破断しなかった。このように、電磁鋼板に比べて本発明の超高強度鋼板を回転子素材に用いることで、高い回転数まで破断を回避できることが確認できた。

なお、破壊した回転子を調べたところ、どの回転子もインナーブリッジ部とアウターブリッジ部がともに塑性変形しているか破断しており、永久磁石が脱落していた。アウターブリッジ部とは、永久磁石挿入孔が回転子外周部と接近している梁部である。

【0049】

IPMモータとしての評価(図2の回転子を用いた場合)

本発明者らは、超高強度鋼板を用いて図2に示す回転子2(第3回転子)を作製し、モータ性能評価試験に供した。また、電磁鋼板を素材とした回転子も同時に作製し、同様の評価に供した。なお、IPMモータ2の最大出力は3.7kwである。

【0050】

作製した回転子および固定子の仕様は以下の通りである。

第3回転子の仕様

外径：80.0mm、軸長75mm

・積層枚数：0.35mm/210枚

・ブリッジの幅：3.0mm

・永久磁石：ネオジム磁石(NEOMAX-38VH)、40.0mm幅×2.0mm厚×75mm長さ、合計4ヶ埋め込み

固定子の仕様

・ギャップ長：0.5mm

・外径：160.0mm、ヨーク厚：17mm、長さ：75mm

・鉄心素材：電磁鋼板(35A300)、板厚0.35mm

・積層枚数：210枚

・巻線方式：分布巻き

【0051】

それぞれの回転子を用いたIPMモータの5000rpm~12000rpmまでの最大トルクおよび効率を表8に示す。なお、10000rpmを超える回転数で弱め界磁制御を行った。

【0052】

【表 8】

IPMモータとしての評価(図2の回転子の場合)

回転子 鉄心	5000rpm		7500rpm		10000rpm		12000rpm	
	最大トルク (N・m)	モータ効率 (%)	最大トルク (N・m)	モータ効率 (%)	最大トルク (N・m)	モータ効率 (%)	最大トルク (N・m)	モータ効率 (%)
電磁鋼板 35A300	5.2	87	5.1	90	4.9	91	回転せず	
製造方法B No.6	5.5	82	5.5	82	4.9	96	2.5	90

10

【0053】

表 8 に示すように、電磁鋼板を用いた場合、弱め界磁制御を行っても 12000rpm では回転できなくなった。これに対して、保磁力の大きな No. 6 鋼を素材とした回転子では回転可能であり、より高速回転域までの駆動が可能であることがわかる。

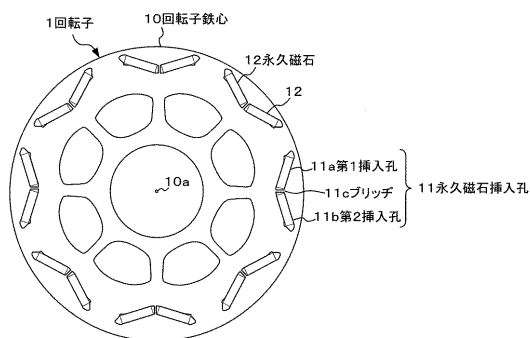
【符号の説明】

【0054】

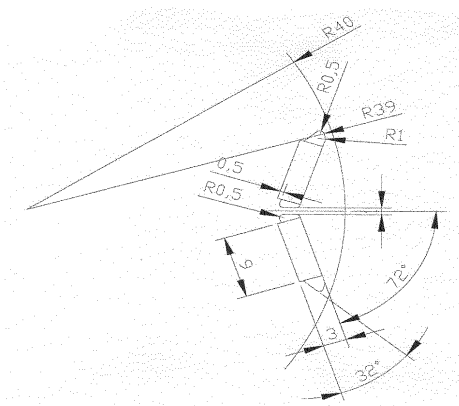
- 1 回転子
- 10 回転子鉄心
- 10a 回転中心
- 11 永久磁石挿入孔
- 11a, 11b 第 1 及び第 2 挿入孔
- 11c ブリッジ
- 12 永久磁石

20

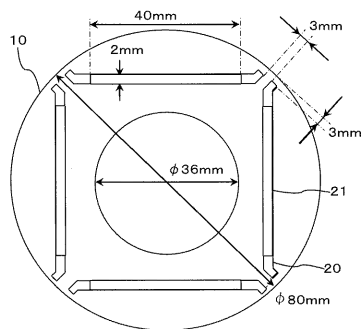
【図 1】



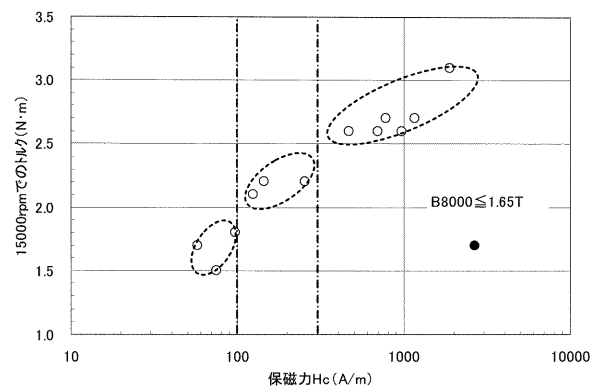
【図 3】



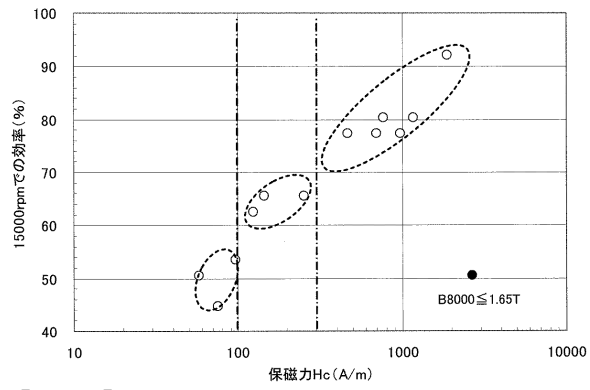
【図 2】



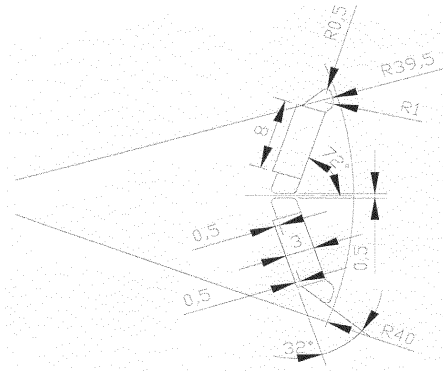
【図 4】



【図 5】



【図 6】



フロントページの続き

- (72)発明者 藤原 進
広島県呉市昭和町 1 1 番 1 号 日新製鋼株式会社内
(72)発明者 森川 茂
広島県呉市昭和町 1 1 番 1 号 日新製鋼株式会社内

審査官 河村 勝也

- (56)参考文献 特開 2 0 0 7 - 3 0 6 7 3 5 (J P , A)
特開 2 0 0 8 - 0 3 1 5 5 3 (J P , A)
特開 2 0 0 9 - 0 4 6 7 3 8 (J P , A)
特開 2 0 1 0 - 2 2 9 5 1 9 (J P , A)
特開平 1 1 - 0 8 9 1 4 4 (J P , A)
特開 2 0 1 1 - 0 6 7 0 4 8 (J P , A)
特開 2 0 0 5 - 2 2 4 0 0 6 (J P , A)
特開 2 0 0 4 - 0 4 1 0 0 0 (J P , A)
特開 2 0 0 2 - 1 3 6 0 0 9 (J P , A)
特開 2 0 0 6 - 1 9 6 8 5 5 (J P , A)
特開平 0 8 - 3 3 1 7 8 4 (J P , A)
特開 2 0 0 9 - 0 3 8 9 0 8 (J P , A)
特開 2 0 0 8 - 2 3 1 4 6 2 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

H 0 2 K 1 / 2 7
H 0 2 K 1 / 2 2
H 0 2 K 1 / 0 2
C 2 2 C 3 8 / 0 0