学術論文

高強度鋼板の IPM モータのロータコアへの適用と評価

Evaluation of rotor core made of high strength steel plates for IPM motor

野中 剛^{*1}(正員), 平山 雅之^{*1}, 大戸 基道^{*2}(正員)

Tuyoshi NONAKA (Mem.), Masayuki HIRAYAMA, Motomichi OHTO (Mem.)

In recent years, high rotational speed of IPM motors is required for applications like Electric Vehicle(EV). In case of rotors having same shape, maximum against centrifugal force is decided by the strength of rotor core. Therefore, it is possible to achieve higher rotational speed if higher strength steel plate, instead conventional silicon steel plate, is used. However, in case of higher strength steel plate, the efficiency of motor drops as iron loss increases due to the degradation of its electromagnetic characteristics.

This paper reports on the efficiency of a prototype IPM motor with rotor core that using high strength steel plates having a yield point over 3 times higher than the conventional silicon steel plates. The efficiency of the prototype IPM motor is also compared with a rotor core that uses conventional silicon steel plates. It is found that although there is small drop of motor efficiency, the prototype IPM motor achieved a maximum rotational speed which about 2times higher than that of the conventional core IPM motor.

Keywords: high strength steel plate, IPM motor, EV motor, yield point, maximum rotational speed.

(2017 年 2 月 10 日受付, 2017 年 4 月 7 日再受付)

1 緒言

電気自動車用モータ (EV モータ) を変速機なしで用いたいという要望がある。そのため, 近年 EV モータに多用されている埋込磁石型モータ (IPM モータ) の, より高速回転化が求められている[1-2]。高速で回転する IPM ロータの遠心力に対する限界は, ロータコアの形状が同じであれば, 材質の機械的特性で決定される。そのため, 従来用いられてきた電磁鋼板の範囲を越えた強度を有する高強度鋼板を用いれば, 従来以上の高速回転が可能となる。一方, 電磁特性が劣る鋼板であるため, 鉄損の増大による効率の低下が懸念される。

本報告は, 焼入れ処理により従来の電磁鋼板の 3 倍以上の降伏点を有する高強度鋼板の, IPM モータのロータコアへの適用と評価について述べる。評価として, 従来の電磁鋼板を用いた場合とのロータの耐遠心力強度比較, モータの効率比較を行った。

2 EV モータに要求される特性

2.1 高速回転化の要求

Fig.1 に, 平均的な 2L クラス乗用車用 5 速変速機付

連絡先: 野中 剛, 〒803-8530 北九州市小倉北区大手町 12-1, (株) 安川電機 開発技術本部 開発研究所,
e-mail: Tuyoshi.Nonaka@yaskawa.co.jp

^{*1} (株) 安川電機 ^{*2} 安川モートル株式会社

エンジンの, 車軸上におけるトルク・回転速度 (T-N) 特性を示す。1 速と 5 速の変速比は 5 : 1 である。この変速機付エンジンの特性をモータで置き換えた場合, モータの特性は図示のようになり, 1 速における大トルクと 5 速による高回転速度を両立しなければならない。このように, EV モータが変速機付エンジン車同等の特性を得るには, 定出力範囲の広い特性が要求され, 結果として高速回転化が求められる。具体的には, クランク軸上において最大トルク 200N・m (at 4000min⁻¹), 最大回転速度 8000min⁻¹ のエンジン特性に対し, 例えば, 約 2000min⁻¹ でエンジンの 2 倍の最大トルク 400N・m を発生し, 2.5 倍の最大回転速度 20000min⁻¹ のモータ特性が必要となる。

Fig. 1 T-N characteristic on wheel axle.

2.2 課題と方策

このような特性を有する IPM モータを実現するには、大きなトルクを発生できるとともに、最大回転速度の遠心力に耐えるロータが必要となる。

Fig. 2 に IPM モータのロータコアの形状図を示す。V 字状にマグネットを装着する IPM ロータにおいては、内側ブリッジと外側ブリッジの巾が重要となる。ブリッジの巾は、マグネットの洩れ磁束を低減し最大トルクを大きくするためには小さく、ポールシューやマグネットにかかる遠心力に対する強度を向上するためには大きくしたい。特に耐遠心力に対しては、W で示す内側ブリッジの巾が重要であり、例えば、2 倍の高速回転化を達成するには、W を 4 倍にしなければならない。

W を小さくしたまま、高速回転化を達成する方策として、高強度鋼板をロータコアに適用する。本材料は、焼鈍状態では従来の電磁鋼板並みの低い強度であり、焼入れ処理により鋼板の範疇では最大に近いレベルの強度となる。

本材料は焼入れ処理により強度が向上するとともに硬度も増大する。ロータコアとして打抜き加工する場合、型寿命を低下させる欠点が心配される。そのため、量産時では柔らかい焼鈍材として打抜き加工を行い、ブリッジ近傍のみを焼入れ硬化し、遠心力に対する強度を向上することを想定している。

3 高強度鋼板と電磁鋼板の特性

Table 1 に、本評価で用いた高強度鋼板と電磁鋼板の

Fig. 2 Shape of rotor core

特性比較を示す。残留磁束密度 (Br), 飽和磁束密度 (Bs), 保磁力 (Hc) は、磁気的特性を比較する項目として示した。降伏点は、材料の機械的強度を比較する項目として示した。

高強度鋼板の適用においては、ブリッジ近傍のみを焼入れ処理するロータコアの試作は行わず、焼鈍材と焼入れ材によるロータコアを別々に試作した。

鋼板の記号を説明する。

X : サンプル材 0.5t (X 社製高強度鋼板の焼鈍材)

Y : サンプル材 0.5t (Y 社製高強度鋼板の焼鈍材)

E : サンプル材 0.5t (X 社製高強度鋼板の焼入れ材)

F : 50HST 0.5t (新日鐵住金製高張力電磁鋼板)

G : 50H250 0.5t (新日鐵住金製電磁鋼板)

X, Y は、従来板バネや剃刀の刃、その他多くに用いられる炭素鋼の冷延鋼板であり、高強度材料としては、安価な部類の鋼板である。指定の板厚に圧延後焼鈍を行い絶縁皮膜を施した。

E は、X を焼入れ後絶縁皮膜を施した高強度鋼板である。

F は、新日鐵住金製の高張力電磁鋼板 (商品名) であり、ロータの高速回転化に供する電磁鋼板である[3]。E に対し半分程度、一般的な電磁鋼板に対し 2 倍程度の降伏点を有する。

G は、新日鐵住金製のハイライトコア (商品名) である。一般的な電磁鋼板の代表として比較評価を行う。

高強度鋼板を用いた IPM モータの鉄損は、保磁力の増大に影響されるところが大きいと思われる。X, Y の保磁力は、G の 10 倍以上、F の数倍程度である。E の保磁力はさらに大きい。このようなヒステリシス特性の異なりにより、どの程度効率が低下するかを評価する。また、E を用いたロータコアで高速回転化が可能になることを確認する。

Table 1 Characteristic comparison of rotor core materials.

略記号		X	Y	E	F	G
Br	T	1.43	1.30	1.21	1.18	0.54
Bs	T	1.79	1.69	1.68	1.75	1.74
Hc	A/m	410	723	1584	240	40
抵抗率	$\mu \Omega \cdot \text{cm}$	18	18	22	—	59
降伏点	$\text{N} \cdot \text{mm}^2$	304	583	1590	841	480
硬度	Hv	—	186	480	234	213

4 過回転破壊評価

高強度鋼板を用いたロータコアが、従来の電磁鋼板を用いたロータコアより高速回転化できることを確認するため、E, F, G を用いたロータコアを試作し、過回転破壊評価を行った。乗用車用 EV モータへの適用可能性を広げるためには、より大きなロータ外径で評価したいため、サイズは $\Phi 160\text{mm}$ とした。

Fig. 3 に、過回転破壊評価結果を示す。G, F はそれぞれ 13000 min^{-1} , 19000 min^{-1} で破壊し、E は 23000 min^{-1} でも破壊しなかった。計算結果は、回転中のロータコアを応力解析し、いずれかの部位の応力が Table 1 で示した降伏点を超える回転速度を示している。そのため、実際の破壊回転速度は計算結果より高い回転速度となっているが、降伏点の大きさの順位に従って破壊回転速度が決定し、E を用いたロータコアの高い耐遠心力強度が確認できた。

Fig. 4 は、F を用いたロータコアの評価後の破壊状況である。8 と記載した磁極のように、内側ブリッジが

Fig.3 Destroyed speed of rotor cores.

Fig.4 Outlook of destroyed rotor core.

破断寸前に塑性変形し、外側ブリッジが破断していないポールシューがあることから、内側ブリッジが破壊の起点であることがわかる。

5 効率評価

5.1 試作モータ

高強度鋼板と従来の電磁鋼板との効率比較を行うため、最大出力 12kW の IPM モータを試作した。ロータは Table 1 で示した 5 種類の鋼板を交換可能とした。

Fig. 5 に、E を用い試作したロータコアの 1 枚を示す。永久磁石を V 字に装着した 8 極ロータである。高速回転が可能な割にはブリッジの巾を小さく設定している。そのため、ロータ表面における最大接線力は 9.1N/cm^2 、トルク密度は $4.1\text{N}\cdot\text{m/kg}$ であり、従来の IPM モータと比較して同等以上の十分に大きな最大トルクを発生できる。Fig. 6 に、試作モータを示す。弊社製のサーボモータをベースにロータを新設計し、巻線仕様を変更した。Table 2 に、試作モータの仕様を示す。

Fig.5 Outlook of prototype rotor core.

Fig.6 Outlook of prototype motor.

Table 2 Specifications of prototype motor.

Motor type	IPM
Number of Pole	8
Maximum torque	58 N·m (at 2000min ⁻¹)
Rotor size	Φ98.4mm , L42mm
Mass	14kg

Fig. 7 EMF 100% situation of prototype rotor.

Fig. 8 EMF 62% situation of prototype rotor.

Fig. 9 EMF 20% situation of prototype rotor.

ロータコア内で発生する鉄損は、ヒステリシスループ上のマイナーループが描かれる動作点の位置で影響を受けると考えられる。そのため、ロータから発生する界磁を3段階に変え、各々の状態において比較評価を行った。試作ロータは、シャフト先端に装着されたボルトを回転させると中央の磁極部分が両側の磁極部分に対して任意の位置に移動できるしくみを備えている。

Fig. 7からFig. 9に、3段階の界磁状態のロータを示す。磁界解析によれば、Fig. 2で示したポールシュー表面近い中央部での動作点最大値は、それぞれ 1.53T, 1.23T, 1.10T の磁束密度であった。モータに組み込まれた状態において、Fig. 7の誘起電圧 (EMF) を100%とすると、Fig. 8, Fig. 9はそれぞれ62%, 20%であった。

5.2 効率比較

3相200Vを電源として、弊社製の22kWインバータを用い速度制御で、試作モータを駆動した。本インバータは磁極位置を回転角度上で任意に指令する機能を有する。2000min⁻¹以上の回転速度では、磁極位置指令値を進み方向に修正し、弱め界磁制御と同様な駆動を行うことで、高速回転での効率評価を行った。

効率は、試作モータの機械的出力を電気的入力で除して算出した。機械的出力は速度計とトルクメータを用い、電気的入力電力計を用いて測定した。

評価は、5種類の鋼板について、強度に応じた許容回転速度まで行った。そのため、X, Y, Gは12000min⁻¹まで、Fは16000min⁻¹まで、Eは22000min⁻¹まで駆動した。

Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12に、それぞれEMF100, 62, 20%状態における最大効率-回転速度特性の比較を示す。モータを一定速度で回転しながら、接続した負荷機の負荷を5段階ほど上げてゆき、測定値より計算した効率のなかの最大値を回転速度に対して示している。最大効率となる弱め界磁電流の位相角を求めるため、各負荷状態で効率最大値とその前後計3種類の磁極位置指令値での測定値を得るようにした。Fig. 10に示したEMF100%状態における6000, 10000, 12000min⁻¹での最大効率はそれぞれ約2.5, 7, 10kWで得られた。Fig. 11に示したEMF62%状態における6000, 10000, 12000min⁻¹での最大効率はそれぞれ約2.5, 5~7, 5~7kWで得られた。Fig. 12に示したEMF20%状態における6000, 10000, 12000min⁻¹での最大効率はそれぞれ

Fig.10 Efficiency comparison on 100%EMF.

Fig.12 Efficiency comparison on 20%EMF.

Fig.11 Efficiency comparison on 62%EMF.

Fig.13 Efficiency comparison on 100%EMF, 12000min⁻¹.

約 1.2, 1.3~1.8, 1.3~1.8kW で得られた。

5 種類の鋼板全てが比較できる 12000min⁻¹ までの効率を比較すると、全体的に大きな差が見られない。例えば、Fig. 10 では、2000min⁻¹において最大効率95%前後から 12000min⁻¹にかけて 88%前後まで低下するが、4つの回転速度での全ての鋼板の効率の違いは2.5%で

あった。Fig. 11 も同様で、Fig. 12 では4%程度である。また、Table 1 に示した特性から考えると効率は良い方から、G, F, X, Y, Eの順になると予想されたが、大きな差が見られなかった。強いて言えば電磁鋼板 F, Gに対し、高強度鋼板 X, Y, Eの効率の低下は、1~3%程度であった。動作点の違いによる影響も大きな差が

Fig.14 Efficiency comparison on 62%EMF, 12000min⁻¹. Fig.15 Efficiency comparison on 20%EMF, 12000min⁻¹.

見られなかった。

X, Y, E の効率は同等であり、製造メーカーの違いや焼入れ有無の違いが効率に与える影響も小さいことが確認できた。

Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15 に、それぞれ EMF100, 62, 20% 状態、12000min⁻¹ における効率－出力特性の比較を示

す。結果は同様に、F, G に対し、X, Y, E の効率の低下は、1～3%程度であった。

効率比較の結果は、全体的に測定誤差の範囲を出ないと考えられる。そこで、効率に影響を与える他の要因について述べる。試作モータは、負荷側と反負荷側のベアリングに開放形ベアリングを用いている。試作モータのベアリングサイズが大きく高速回転時のロスが大きかったため、応急的にグリスを除去し、鋼板の違いによる効率評価を実施した次第である。Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15 に示した H は、電磁鋼板 G に対しグリス封入形ベアリングを用いた場合の測定結果である。グリス封入形ベアリングは、Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15 の全てで効率の低下が見られる。EMF が小さい状態であるほど、出力が小さいほど効率の低下は大きい。ベアリングがグリス封入形か開放形ということに比べれば、鋼板の違いによる効率の差異は小さい。つまり、測定誤差はベアリングに起因するところが多いものの、高強度鋼板のロータコアへの適用が効率を損なうことなく、高速回転化に有効な手段であることが実証できたと考える。

高強度鋼板をロータコアに用いることにより、伝達効率 85%程度[4]と言われるオートマチックや CVT 等の変速機を不要にできるため、15%の効率低下が 1～3%程度の効率低下に改善できる。しかし、Fig. 10 に示したように、少なくとも 15000min⁻¹ 以上の回転領域では、効率が 80%を下回り、オートマチックに劣る結果となっている。これは高強度鋼板の使用有無の問題ではなく、今後高速回転に適する適切なベアリングを使用するなどして改善できると考えている。

5 結言

高強度鋼板を IPM モータのロータコアへ適用し、高い耐遠心力強度を確認した。また、従来の電磁鋼板を用いた場合との効率比較では効率の低下は 1～3%程度であった。EV モータを変速機なしで用いる目的に対して、高強度鋼板のロータコアへの適用は、IPM モータの高速回転化に有効な技術になると考える。

謝辞

その後、本高強度鋼板が市販品として入手可能になったことを喜ばしく思う。サンプル提供等ご協力いただいた、日立金属(株)、モリテックスチール(株)の担当者各位に感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 堺 和人：「電気自動車用モータの技術動向」，平成 16 年度電気学会産業応用部門大会，2-S10-4，pp II-154-157.
- [2] 武田洋次，松井信行，森本茂雄，本田幸夫，埋込磁石同期モータの設計と制御，オーム社，p.61，2001.
- [3] 「ハイブリッド／電気自動車駆動モータ用電磁鋼板の最近の動向」，新日鉄技報，第 393 号，2012.
- [4] 「省エネルギーに貢献する自動車駆動系とその要素技術」，NTN TECHNICAL REVIEW，No.75，2007.