

論説



Paper

高保磁力磁石を用いた HEV 車用モータの小形化の検討

加納善明 *

A Study of Downsizing the Motor for Traction Drive of a Hybrid Electric Vehicle by Use of High Coercivity Magnets

Yoshiaki Kano

Synopsis

The distributed winding interior permanent magnet (IPM) motor is generally used for the traction drive of hybrid electric vehicle because it assumes wide torque-speed range. However, they have a big winding-overhang producing unnecessary copper-losses and extending the stator axial length. That reduces the torque density and increases the costs. The solution is using of concentrated windings. This solution makes it can significantly reduce (roughly 50 %) the winding-overhang. The increase of torque density is limited by permanent magnet demagnetization at high-current operation. To solve the problem, the high coercivity magnet is necessary, preventing the motor from demagnetizing. This paper examines the feasibility study of increasing torque density to the concentrated winding IPM motor with using of high coercivity magnet (2387 kA/m, 30 kOe). The results I got is the torque density can be increased 25 % compared to the conventional distributed winding motor, which realizes 25% downsizing of the motor.

1. まえがき

近年、地球環境に優しい輸送手段として電気自動車 (EV) およびハイブリッド自動車 (HEV) が実用化されている^{1)~3)}。EV や HEV の駆動モータのように比較的大出力のモータに永久磁石モータを用いるためには、動作磁束密度が高く耐熱性の高い磁石が必要である。1982 年に発明され急速に進歩を遂げた Nd-Fe-B 焼結磁石は、この要求を満たす画期的な磁石であり、永久磁石モータを HEV 駆動に適用することが初めて可能となった。そして 1997 年、量産 HEV が市場導入され、急速に普及台数を伸ばしている。環境対応技術の柱として HEV の更なる普及拡大を図るには、燃費向上と低コスト化が必須であり、駆動モータの小形・軽量化が重要課題の一つとなっている。

HEV 駆動モータでは、動作環境が 180℃ 前後になることが想定される⁴⁾。Nd-Fe-B 磁石は、温度上昇により残留磁束密度、保磁力ともに低下するが、永久磁石としての機能を維持するためには、高温環境において保磁力を優先的に確保する必要がある。保磁力は温度上昇にともな

いはほぼ直線的に低下することから、高温環境において必要な保磁力を室温状態での値に換算すると 2387 kA/m (30 kOe) となり、非常に高い固有保磁力が必要となる。

現在、保磁力向上のために Nd-Fe-B 磁石に Dy などの重希土類元素を添加しているが、将来の EV および HEV の需要拡大に対し、希土類資源の供給不足が発生する可能性がある。このため、より少ない添加元素で保磁力のみを効果的に向上させるため、Nd-Fe-B 結晶粒の微細化・原料粉末の最適化技術や製造技術などの開発が進められている^{5)~7)}。

以上の背景のもと本稿では、材料・製造技術の進展により Nd-Fe-B 磁石の高保磁力化が仮に達成された場合に、モータの性能がどこまで向上するかについて検討・考察する。具体的には、Fig.1 の特性を有する希土類永久磁石 (残留磁束密度 1.22 T, 保磁力 1989 kA/m) が、残留磁束密度を維持したまま保磁力を 2387 kA/m まで向上できた場合に、HEV 駆動モータがどこまで小形・高トルク密度化できるかについて検討する。

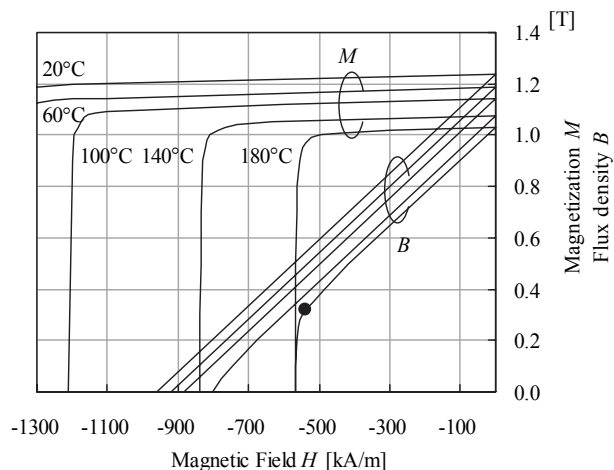


Fig.1. Demagnetization curves with different temperature.

2. HEV 駆動モータの要求性能とモータ構造

本章では、HEV 駆動用モータとして与えられた要求性能と制約条件に対し、それらを全て満足するモータ構造を Fig.1 の市販磁石ベースで検討する。なお、以下の解析・設計検討には、有限要素非線形磁場解析 (FEM) を用いている。

2. 1 HEV 駆動モータの要求特性

シリーズ・パラレル式 HEV 主駆動用モータの代表的な特性を Fig.2 に示す。同図はモータの回転速度に対する必要トルクを示したものであるが、ガソリン車の 1 速に相当する低速大トルク領域と 2 速以上に相当する広範囲定出力領域を同時にミッションレスで実現しなければならない。本検討で対象とした HEV 主駆動用モータの要求性能とモータ駆動時の電源制約を Table 1 に示す。モータ外径は 260 mm、モータ軸長はコイルエンドを含めて 160 mm となっている。

Table 1. Design Restrictions and Requirements.

Limitations on power circuit	Inverter bus voltage V_{dc}	650 V
	No-load induced voltage (@ max. speed)	$\leq 900 V_{0\text{-peak}}$
Requirements	Max. torque	320 Nm
	Max. speed	12000 rpm
	Max. output	100 kW

2. 2 要求性能を満足するモータ構造

現在の HEV 駆動用永久磁石モータでは、極低・低中速域での最大トルク発生能力および単位損失あたりのトルクを大きくするため、Nd-Fe-B 磁石による磁気装荷の向上が図られている。しかし、通常バッテリーなどで利用電源電圧に制約を持つ HEV 用途では、磁気装荷の増加は速度起電力係数の増加をもたらし、最大運転速度範囲を狭めることとなる。現在、この対応策として、磁石を回転子内部に埋め込んだ埋込磁石モータ (以下、IPMSM) に、弱め界磁制御を組合せて最大速度を拡張する方法が採られている。弱め界磁制御法について説明する。

一般に d - q 軸座標系で表現される IPMSM の電圧方程式は次式で与えられる⁸⁾。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Phi_m \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 v_d , v_q は電機子電圧の d , q 軸成分、 Φ_m は永久磁石による磁束鎖交数、 ω は電気角速度、 L_d , L_q はインダクタンスの d , q 軸成分、 i_d , i_q は電機子電流の d , q 軸成分、 R は電機子巻線抵抗を表す。式 (1) 右辺第 2 項は、モータ回転中に発生する永久磁石固定磁束による逆起電力である。この逆起電力はモータの速度 $\omega_m (= \omega / P_n, P_n$: 極対数) に比例して上昇し、インバータの DC バス電圧値を超えたとき運転限界となる。弱め界磁制御では、負の d 軸電流を流し、等価的に永久磁石磁束量を抑制することで、発生電圧を低減させて運転範囲の拡大を実現している。

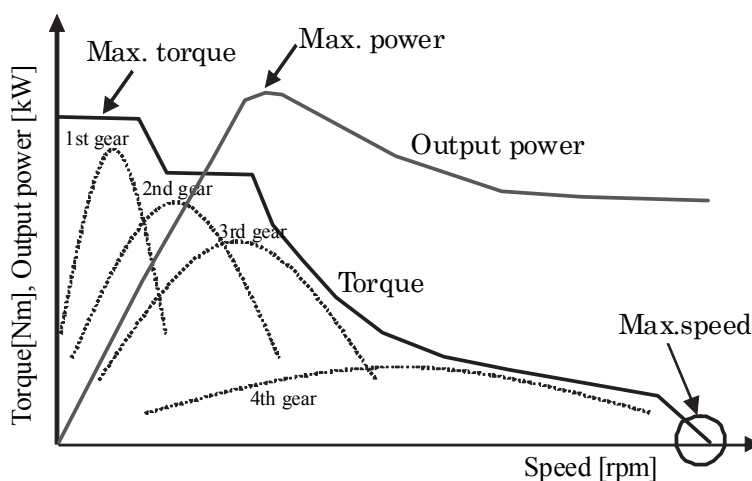


Fig.2. Requirements as targeted traction-drive motor.

弱め界磁制御時では、巻線により生じる巻線起磁力が、永久磁石に対する反磁界となって作用する。この反磁界によって、永久磁石の動作点はそのクニック点（保磁力 H_{CB} 近傍）を超えると、元の状態に戻ることができず不可逆減磁を生じる。一度不可逆減磁を生じれば、それに応じて最大トルクなどモータ特性が劣化するため、あらゆる運転条件下で永久磁石の不可逆減磁を生じないように磁石形状の設計をしなければならない。

他方、高速運転時にモータ駆動システムのコントローラが故障した場合、弱め界磁制御を含む一切の制御が不能となる。この場合、インバータ端子間に素子耐圧を超える逆起電力が生じると、インバータ主回路の破壊を引き起こす。このため、HEV 駆動用モータでは、最高速度時の逆起電力を素子耐圧以下に抑える永久磁石磁束 Φ_m の設計が重要となる。

ここで、永久磁石磁束と出力トルクの関係について考えてみる。 d - q 軸上で表される IPMSM の出力トルク T は次式で与えられる。

$$T = P_n \Phi_m i_q + P_n (L_d - L_q) i_d i_q \quad (2)$$

右辺第 1 項はマグネットトルクと呼ばれ永久磁石磁束に起因するトルクで、第 2 項はリラクタンストルクと呼ばれ磁気的な突極差で生じるトルクである。ここで、最大電機子電流実効値 $I = 250 \text{ A}_{rms}$ 、インバータ素子耐圧 $V_{lim} \leq 900 \text{ V}_{0-p}$ 、極対数を $P_n = 4$ と仮定すると、無負荷で最高速度 12000 rpm まで回転させるには、永久磁石磁束鎖交数 Φ_m を $\Phi_m \leq 0.126 \text{ Wb} (= V_{lim} / (\sqrt{2} P_n \omega_m))$ とする必要がある。この場合、最大トルクは式 (2) より線形計算で 220 Nm となり、要求最大トルク 320 Nm を満足できない。つまり、Table 1 の設計制約を満足した上で、要求最大トルクを実現するには、リラクタンストルクの効果的な利用が不可欠となる。以下では、リラクタンストルクの有効利用、磁石の減磁耐力の観点から回転子および固定子構造について検討する。

2. 3 回転子構造の検討

リラクタンストルクは、式 (2) 第 2 項に示されるように、 d 軸インダクタンスと q 軸インダクタンスの差、すなわち突極性により生ずる。突極性を有する回転子構造としては、Fig.3(a) の永久磁石を表面に配置した INSET 型と、Fig.3(b) の回転子内部に磁石挿入孔を設け、永久磁石を回転子内部に配置した埋め込み磁石型 (IPM) の 2 種類に大別される。どちらもリラクタンストルクを得ることが可能であるが、INSET 型ロータは、

- ・ 磁石保持機構がなく機械強度が弱い
- ・ 巻線による反磁界がギャップを介して直接磁石にかかるため減磁耐力が低い

などのデメリットを持つ。そこで、回転子構造には埋込磁石型を採用する。埋め込まれる磁石形状については、平板磁石を 1 極ごとに 1 層埋め込んだ構造としている。

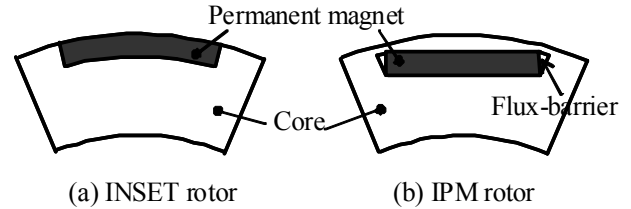


Fig.3. Rotor configurations.

2. 4 固定子構造の検討

IPMSM の固定子巻線には、分布巻もしくは集中巻が用いられ、その構成例が Fig.4 である。図示のように分布巻のコイルは、少なくとも固定子の 3 スロットを渡る必要があり、コイルエンド長（軸方向長）が長くなってしまふ。一方、集中巻は一つのティースにコイルを巻くため、コイルがスロットを渡ることがなく、コイルエンド長を大幅に低減できる。コイルエンド長の低減は、銅損低減による効率向上だけでなく、トルク密度に起因するモータ必要空間の低減が可能である。一般的に集中巻では、分布巻に対しコイルエンド長を 30 ~ 50 % 低減でき、HEV 駆動用モータとして一般的な薄型構造の場合、同じトルク発生能力を持つモータ鉄心体積であれば、トルク密度は少なくとも 10 % 向上する。そこで、トルク発生効率の観点から両巻線方式を比較してみる。

マグネットトルクは、コイルに鎖交する永久磁石磁束の大きさのみに起因するため、両巻線方式間にはほぼ差はないといってよい。一方、リラクタンストルクは、回転子一極あたりの巻線が形成する巻線起磁力により決まる。分布巻では、多スロット化により巻線起磁力分布が正弦波に近づくため、その基本波は短節巻である集中巻に対し大幅に向上する。最もリラクタンス発生能力が高いのは分布巻であり、次に集中巻の極数：スロット数が 2:3

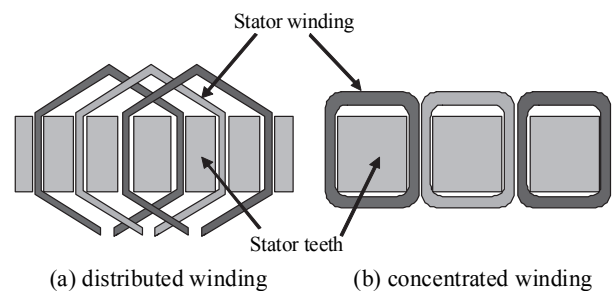


Fig.4. Conceptual diagram of distributed and concentrated windings.

系列と4:3系列, 10:12系列となっている。つまり, 同一の回転子・巻線起磁力・固定子鉄心体積のもとでは, モータの発生トルクは, 分布巻>集中巻となる。集中巻では巻線占積率が分布巻に比べ高くできるので, 同一巻線起磁力のもとでは固定子鉄心体積を多くでき, 特に高負荷時のリラクタンストルク発生効率を向上できる。そこで, 以下のトルク発生効率の比較では, 巻線占積率に差を持たせている。

トルク発生効率の比較検討に用いた分布巻および集中巻モータの構造を Fig.5 に示す。モータの回転子構造は, 平板一層の IPM 構造である。図示の回転子ブリッジ幅 3.5 mm は, 高速回転時において永久磁石が飛散しない最小幅として決定している。具体的には, 最高回転数 12000 rpm において, 鋼板内の主応力が 300 MPa 以下 (許容値に対し安全率 2 倍程度) となるように決定している。

集中巻モータにおける極数: スロット数は, リラクタ

ンストルク発生効率に優れる 2:3 系列の 8 極 12 スロットを選択している。分布巻構造の巻線構造は, 集中巻モデルと回転子を同一とするため, 8 極 48 スロットを選択している。両モータ構造の諸元を Table 2 に示す。モータ外径, エアギャップ長, 磁石・鋼板材料特性および 1 相あたりの巻数は, 両モータで同一としている。コイル占積率は, それぞれの巻線方式の実績値として分布巻 48 %, 集中巻 60 % とする。

Fig.6 は, 最大電流通電時 ($I=250\text{ A}_{rms}$) の電流位相角 β に対するトルク特性の比較結果で, マグネットトルク, リラクタンストルクの最大値をまとめたものを Table 3 に示す。最大マグネットトルクはほぼ同程度であるのに対し, 集中巻モータでは, 最大リラクタンストルクが 39 % 低下した結果, 最大出力トルクが 8.6 % 低くなっている。これをトルク密度で評価すると, リラクタンストルク密度は約 8 % 低い, 出力トルク密度は約 18 % 高い結果

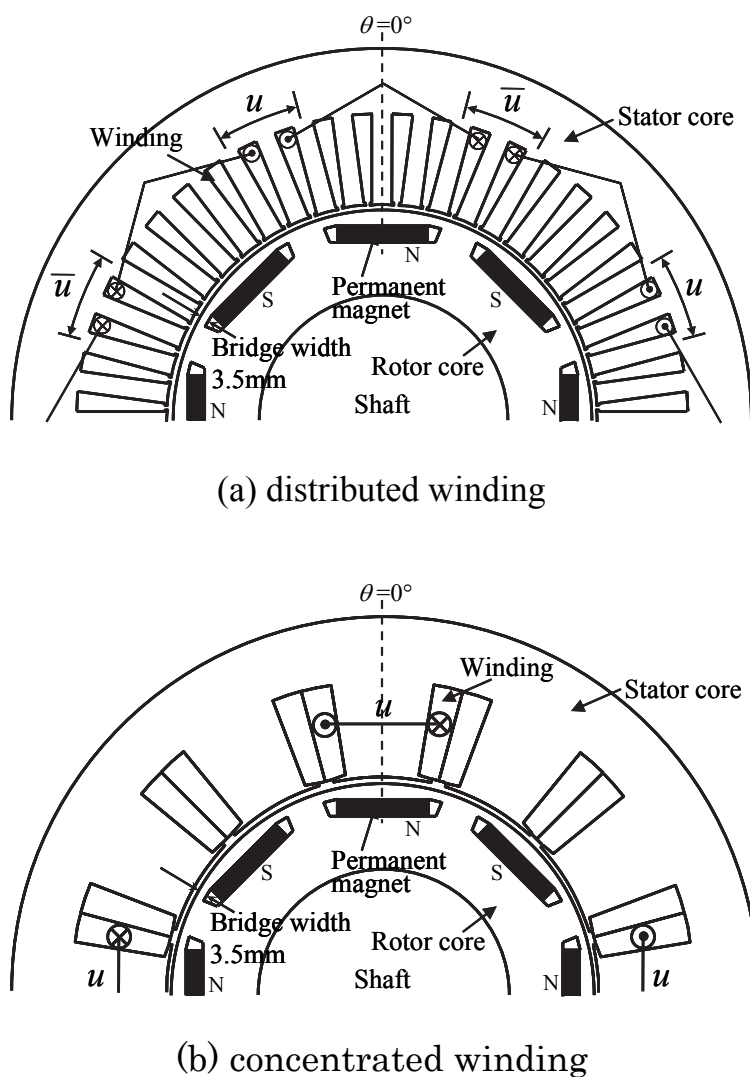


Fig.5. Motor structures.

Table 2. Specifications of test motors.

	Distributed	Concentrated
Motor outer diam.[mm]	260	
Motor length [mm]	160	125
Core stack length [mm]	100	
Air gap length [mm]	0.5	
Bridge width [mm]	3.5	
Stator pole arc. [deg]	4.2	20
Stator yoke width [mm]	22.75	20
No. of poles	8	
No. of slots	48	12
Coil filling factor [%]	48	60
No. of turns/slot [turn]	6	12
Depth of embedded PM [mm]	5.32	
Magnet length [mm]	6.0	
Magnet width [mm]	35	
Max. current in rms [A_{rms}]	250	

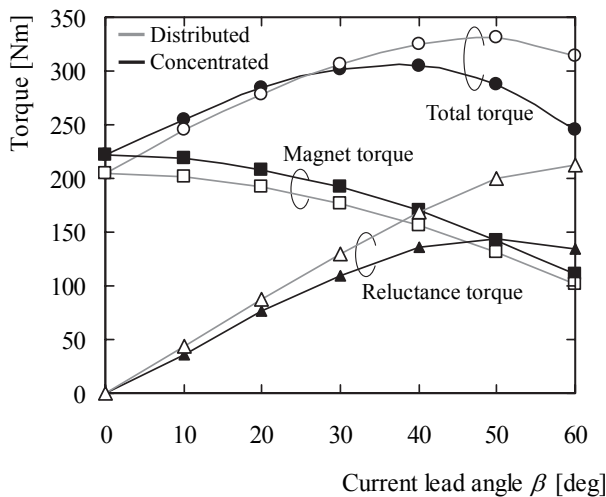


Fig.6. Torque vs. current lead angle characteristics (without considering demagnetization of PM).

Table 3. Torque characteristics.

	Distributed	Concentrated
Total torque [Nm]	331.8	305.4
Magnet torque [Nm]	203.9	215.7
Reluctance torque [Nm]	200.7	144.3

となる。つまり、集中巻モータは、小形・高トルク密度化のポテンシャルが非常に高いと判断できる。

ここで、両モータの減磁耐力についてみる。熱減磁の解析条件は、HEV 駆動用途を前提に磁石温度 180℃、電流位相角 $\beta = 60^\circ$ とし、不可逆減磁の閾値 (クニック点) については、Fig.1 より 0.3 T とする。減磁率の評価は、総磁石量に対する不可逆減磁部分の磁石量の割合 [%] で行う。Fig.7 は、巻線電流に対する磁石の減磁率を両モータについて解析した結果である。最大電流 250 A_{rms} を通電した場合の減磁率は、分布巻 4.8 %、集中巻では 84.2 % となっており、集中巻ではモータの減磁評価の一般的な目安である減磁率 5 % 以内を満たしていないことがわかる。この減磁耐力の差異は、Fig.8 に示す三相巻線がつくる起磁力分布の比較からわかるように、集中巻では起磁力分布が方形波状となり、同一巻線電流通電時に、より大きな反磁界が磁石にかかるためである (回転子位置

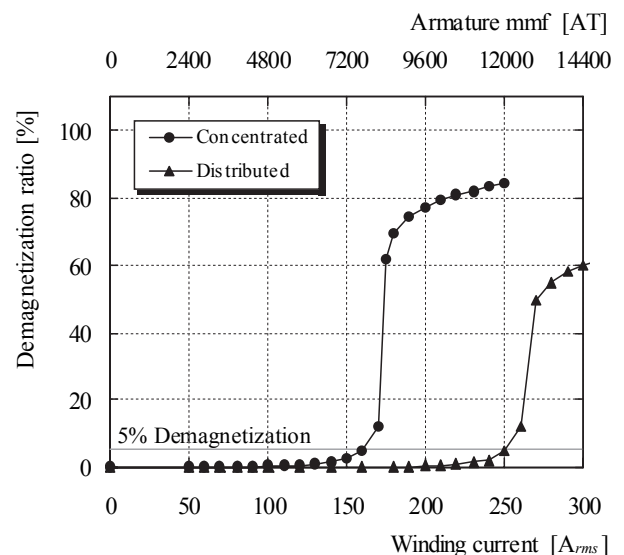


Fig.7. Relationship between mmf of windings and demagnetizing ratio.

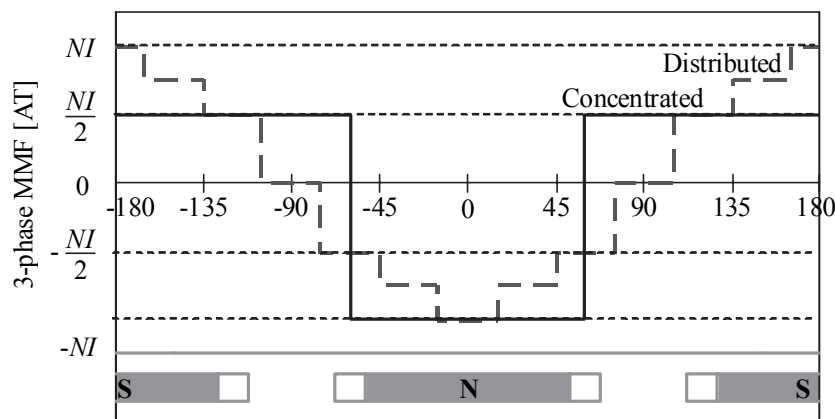


Fig.8. Space distribution of Three-phase MMF.

0 deg, -d 軸のみ通电).

次に、減磁を考慮した場合のトルク発生効率の比較を行う。Fig.7 から、減磁率 5 % 以内を満たす最大巻線電流値を求めると、集中巻 160 A_{rms}、分布巻 250 A_{rms} となる。この電流値のもと、電流位相角に対するトルク特性をみたものが Fig.9 である。Fig.6 と Fig.9 の比較から、減磁させないための電流値制約によって、集中巻モータの出力トルクは、分布巻に対し 35 % 低下し、出力トルク密度が 25 % 低い結果となる。

以上の結果より、Fig.1 の市販磁石の使用を前提とすれば、分布巻 IPMSM が HEV 駆動モータに適していると判断できる。現在実用化されている駆動モータも、このタイプが多い。一方、集中巻 IPMSM は、減磁の問題が無ければ、EHV 駆動モータの小形・高トルク密度化に大きく貢献できると考えられる。そこで以下では、集中巻 IPMSM にみられる減磁の問題を高保磁力磁石により解決した場合に、HEV 駆動モータをどこまで小形・高トルク密度化できるかについて検討を行う。

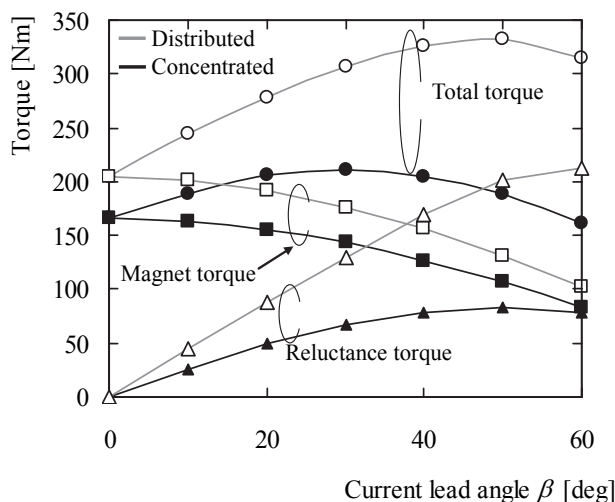


Fig.9. Torque vs. current lead angle characteristics (with considering demagnetization of PM).

3. 高保磁力磁石によるモータの高トルク密度化

3. 1 比較対象とした HEV 駆動用分布巻 IPMSM

Fig.1 の市販磁石の使用を前提に、HEV 駆動用モータの仕様をすべて満足する分布巻 IPMSM を設計した。その諸元を Table 4 に示す。同表に示すモータは、トルク密度・出力密度とも、水冷方式のモータとして最高クラスに位置している。以下では、Table 4 のモータに対し、更なる

トルク密度向上の実現を目的に、高保磁力磁石を用いた集中巻 IPMSM の設計検討を行う。設計検討では、形状および電源制約は、すべて対象モータと同一としている。

Table 4. Specifications of designed motor.

Motor volume	8.49 l
Motor outer diameter	260 mm
Motor length	160 mm
Torque density	39 Nm/l
Power density	13.3 kW/l
Max. current	250 A _{rms}
Max. current density	18 A _{rms} /mm ²
No-load induced voltage (@12000 rpm)	≤ 900 V _{0-peak}

3. 2 高保磁力磁石による減磁耐力の改善

ここでは、Fig.5(b) の集中巻 IPMSM (以下、基準モータ) を対象に、Fig.1 の現行磁石の固有保磁力 H_{cJ} のみを 1989 kA/m (25 kOe, クニック点 0.3 T) から 2387 kA/m (30 kOe, クニック点 0 T) へ向上した場合の効果を検討する。検討結果を Fig.10 に示す。同図縦軸は固有保磁力を、縦軸は減磁率 5 % 以内で通電可能な最大巻線電流 I_m と 1 相あたりの巻数 N から算出した巻線起磁力 NI_m を示している。また、図中の破線は、Fig.5(a) の分布巻モータの減磁耐力に相当する。

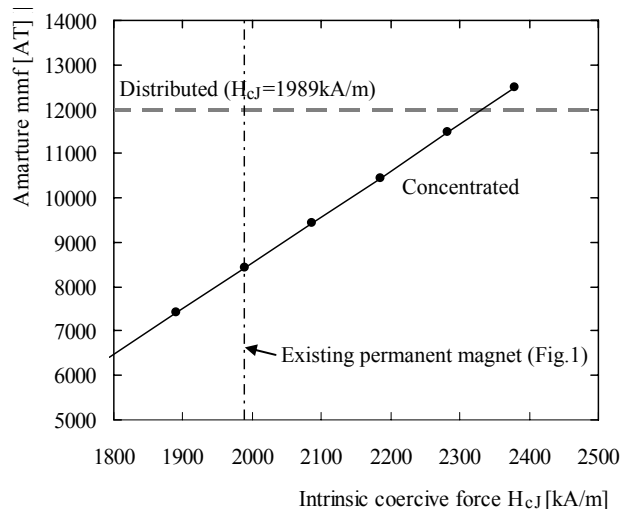


Fig.10. Effect of high coercivity magnet on demagnetization characteristics.

Fig.10 からわかるように、保磁力の増加とともに巻線起磁力 NI_m は線形的に増加し、 $H_{cJ}=2340$ kA/m まで向上できれば、分布巻モータと遜色ない減磁耐力が確保できる。つまり、高保磁力磁石が開発できれば、集中巻 IPMSM により Table 4 の分布巻 IPMSM のトルク密度を凌駕できると考えられる。しかしながら、基準モータは、HEV 駆動モータに要求される最大トルクに対し約 15 Nm 低く、仕様を満足していない。これを受けて、以下では基準モ-

タを出発点に、コストの観点から磁石使用量を同一としたもとで、トルクを増加させる電磁構造設計を行う。

3. 3 最大トルク向上の検討

2.2 節でも述べたように、HEV 駆動用モータでは、インバータの素子耐圧からマグネットトルクが制限されるため、トルクの向上にはリラクタンストルクの向上が大きな役割を果たす。式 (2) で表現されるリラクタンストルク T_R を変形すると次式となる。

$$T_R = P_n L_d \left(\frac{L_q}{L_d} - 1 \right) I_a^2 \sin 2\beta \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 β は電流位相角である。ここで、 $L_d = P_d N^2$ 、 $L_q = P_q N^2$ (N : ターン数、 P_d , P_q : d 軸, q 軸パーミアンス) と置き換えると式 (3) は、

$$T_R = P_n P_d \left(\frac{P_q}{P_d} - 1 \right) (N I_a)^2 \sin 2\beta \quad \dots\dots\dots (4)$$

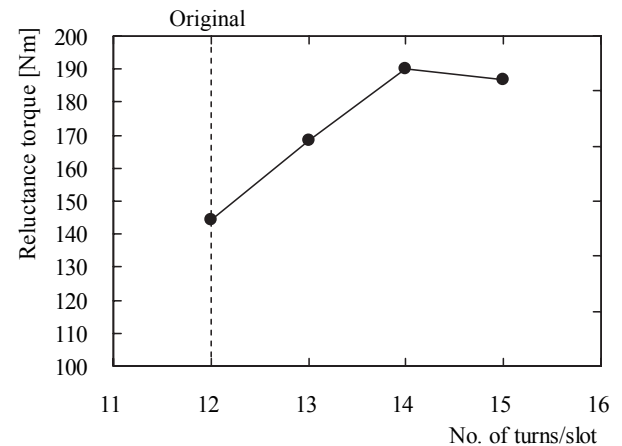
となる。ここで、 P_q/P_d は d - q 軸パーミアンス比、 $N I_a$ は巻線起磁力を意味する。式 (4) より、リラクタンストルクは d - q 軸パーミアンス比と巻線起磁力の二乗の積で与えられる。従って、リラクタンストルクの向上には、巻線起磁力の増大が効果的であるといえる。変換器容量から決まる電流制限内で巻線起磁力を増大するには、ターン数の増加が必要となる。この場合、永久磁石磁束鎖交数の増大と減磁耐力に配慮した設計が必要となる。以下に、基準モータをベースにターン数を増加させる場合の設計法を説明する。

- ・ ターン数の変化によらず、巻線占積率、最大電流密度は一定とする。
- ・ 巻線収容面積は、固定子スロット幅（ティース根元におけるスロット幅）一定のもとで、固定子バックヨーク厚を変化させて調整する。これにより、コイルエンド長を一定にでき、巻数の増加に対しモータ体積を同一にできる。
- ・ 永久磁石磁束鎖交数の制約を考慮して、ターン数を基準モータに対し a 倍したとき、磁石幅を $1/a$ 倍する。磁石厚については、減磁耐力を向上しつつ磁石体積を同一とするため a 倍する。

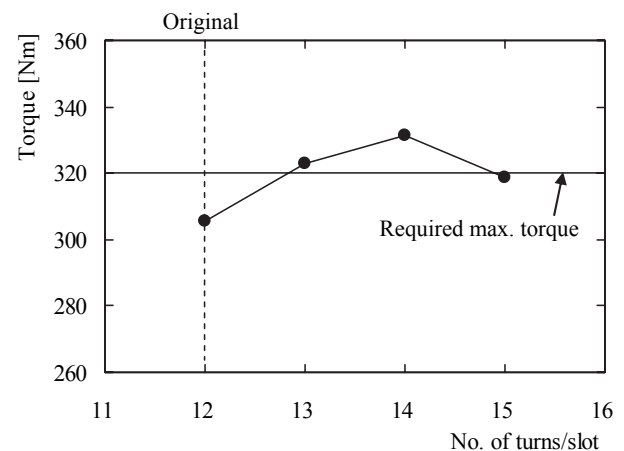
以上の設計法を下に、巻線ターン数ごとにモータモデルを作成し、最大電流通電時のトルク特性を FEM により解析した。その結果を Fig.11 に示す。同図 (a) および (b) は、それぞれ最大リラクタンストルクおよび最大出力トルクの評価結果である。

Fig.11(a) より、巻数を基準モータの 12 ターンから 14 ターンまで変化させた場合、リラクタンストルクはターン数増加率のほぼ 2 乗に比例して増加することがわか

る。この結果、最大電流位相角におけるトルクが増加し、13 および 14 ターンのモデルで目標最大トルク 320 Nm を達成していることがわかる (Fig.11(b))。銅損低減・省材料の観点から、ターン数は少ないほどよいため、ここでは、13 ターンのモデルを最適仕様と決定する。なお、Fig.11(a) で 15 ターンにおいてリラクタンストルクが減少するのは、磁気飽和によりパーミアンス比 P_q/P_d が大幅に減少したためである。



(a) reluctance torque



(b) maximum torque

Fig.11. Torque characteristics vs. number of turns per slot.

4. 集中巻 IPMSM の諸特性評価

前章では、高保磁力磁石を用いた 8 極 12 スロット集中巻 IPMSM のトルク密度向上の可能性について設計検討を行った。本章では、設計結果をもとに、HEV 駆動モータに要求される速度-トルク特性、出力特性などの目標仕様に対する性能評価を行うとともに、トルク・出力密度向上結果について示す。

Table 5 は、設計した 8 極 12 スロット集中巻 IPMSM の仕様である。同表から、無負荷磁束鎖交数 Φ_m は、制限値 0.126 Wb を満たしていることがわかる。Fig.12 に設計モータの性能評価結果を示す。速度-トルク特性については、まず、電流値 $50 A_{rms} \sim 250 A_{rms}$ まで $25 A_{rms}$ 刻みで変化させ、さらに各電流値ごとに電流位相角 β を $0^\circ \sim 70^\circ$ まで 10° 刻みで振ってトルクと磁束鎖交数を解析する。次に、各電流値ごとの磁束鎖交数から端子電圧を算出し、インバータの最大出力電圧を超えない範囲で出力可能な最大トルク値をプロットしていく。速度-出力特性についても同様である。

Fig.12 より、最大トルクは 323 Nm、最大出力は 103.5 kW で、目標特性を満足していることがわかる。比較対象とした分布巻 IPMSM と比較すると、設計モータは、トルク密度 25 % アップ、出力密度 16 % アップを実現している。

Table 5. Specifications of optimum designed motor.

	Value
Motor outer diam.	260 mm
Motor length	125 mm
Core stack length	100 mm
Air gap length	0.5 mm
Bridge width	3.5 mm
Stator pole arc.	20 deg
Stator yoke width	18 mm
No. of poles	8
No. of slots	12
Coil filling factor	60 %
No. of turns/slot	13 turns/slot
Depth of embedded PM	5.32 mm
Magnet length	6.5 mm
Magnet width	32.3 mm
PM remanence @180° C	1.05 T
Relative permeability of PM	1.05
Intrinsic coercivity	2387 kA/m
Type of lamination steel	35H360
Max. current in rms	250 A_{rms}
Max. current density	18 A_{rms}/mm^2
Magnet flux-linkage	0.121 Wb
Motor volume	6.63 l
Torque density	48.7 Nm/l
Power density	15.5 kW/l

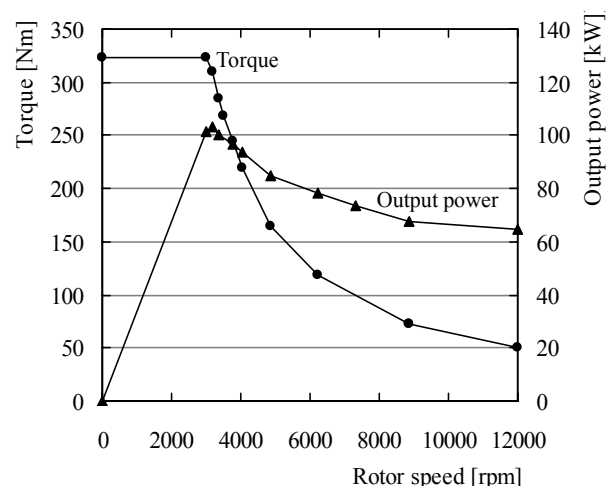


Fig.12. Power/torque characteristics of designed motor.

5. あとがき

本論文では、高保磁力磁石による HEV 駆動用モータのトルク・出力密度向上の可能性について検討を行った。高保磁力磁石の採用により、分布巻構造に対し本質的に減磁耐力の劣る集中巻構造の採用が可能となり、同等のトルク発生能力を有したままモータ軸長を約 2 割低減する設計を行った。FEM を用いた計算機実験評価により設計モータの性能評価を行い、現行 HEV 駆動用モータに比べ、トルク密度 25 % 増加、出力密度 16 % 増加を確認した。

(文 献)

- 1) S. Abe : SAE Tech. Pap. Ser., No.2000-01-C042 (2000).
- 2) M. Okamura, E. Sato and S. Sasaki : Proc. of the 20th International Electric Vehicle Symposium, CD-ROM (2003).
- 3) M. Kamiya : Trans. IEE Japan, 126-D (2006), 4, 473.
- 4) 加藤義雄: 豊田中央研究所 R&D レビュー, 34 (1999), 2, 3.
- 5) M. Kusunoki, M. Yoshikawa, T. Minowa, and M. Honshima : 3rd IUMRS Int. Conf. on Advanced Materials, 1994, 1013.
- 6) H. Nakamura, K. Hirota, M. Shima, T. Minowa and M. Honshima : IEEE Trans. Magnetics, 41 (2005), 10.
- 7) 廣田晃一, 中村元, 美濃輪武久: Abstracts of Autumn Meeting of Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 2005.
- 8) 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, 2001, 11.
- 9) 株式会社日立製作所 総合教育センタ技術研修所: わかりやすい小形モータの技術, オーム社, 2002, 20.