

12 V 電源駆動超高速 PM モータの 効率とパワー密度向上に関する検討

鹿野 将 和田哲朗* 野口季彦 (長岡技術科学大学)

Discussion on Efficiency and Power Density Improvement of
Ultra High-Speed Permanent-Magnet Motor Driven by 12-V Power Supply
Masaru Kano, Tetsuro Wada*, and Toshihiko Noguchi (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

筆者らは車載用スーパーチャージャの電動化を目的として、12 V 電源で駆動される超高速 (1.5 kW, 150000 r/min) PM モータの開発を推進してきた。このモータでは低電圧、大電流、高周波運転が行われるため、同期インダクタンスだけでなく漏れや配線のインダクタンスも低減するように固定子巻線のターン数を極限まで小さく設計した。同時にパーミアンス係数に基づいてモータ形状の最適化も検討し、インバータの導通損やベアリングの摩擦損まで含めた諸損失の最小化も図った⁽¹⁾⁽²⁾。本論文では固定子巻線のターン数を若干変更することにより、更なる駆動システムの総合効率とパワー密度の向上を検討する。

2. 超高速モータの固定子巻線とパーミアンス係数

試作機の同期インダクタンスは $1\mu\text{H}$ 以下で極めて小さい。これは強力な永久磁石 ($\text{BH}_{\text{max}} = 310 \text{ kJ/m}^3$) を使用することによって、大きな空隙を確保するとともに、巻線のターン数を極限まで小さく (1 ターン) した設計によるものである。更に図 1 に示したように、銅バルク材から切り出した巻線を固定子鉄心のティースに密着させることにより、漏れや配線インダクタンスの大幅な低減を可能にした。

一般に、PM モータの誘起電圧は(1)で求められる。

$$E = 2\pi/60 \sqrt{2} \cdot pNk_w w \Phi_g \quad (1)$$

p は極対数、 N は回転数、 k_w は巻線係数、 w はターン数、 Φ_g は空隙磁束である。超高速モータの場合、誘起電圧を大きくするためには w か Φ_g を大きくするしかないが、効率の観点から既に試作したターン数 1 のモータでは Φ_g を大きくすることは得策でない。そこで、巻線のターン数を 2 倍にして駆動システムの総合効率とパワー密度の向上を試みる。モータ電流を PM モータの誘起電圧と同相に制御した場合、端子電圧 V は次式で計算される。

$$V = R_{FET} I + R_a I + j\omega LI + E \quad (2)$$

ただし、 $R_{FET} I$ はインバータ MOSFET ($2 \text{ m}\Omega/\text{相}$) でのオン電圧降下、 $R_a I$ は巻線抵抗による電圧降下、 $j\omega LI$ は同期インダクタンスによる電圧降下、 E は誘起電圧である。実際に試作したターン数 1 のモータについて、定格出力におけ

る各種電圧降下を示すと表 1 左列のようになる。これより、試作機は漏れインダクタンスがほとんど無いため同期インダクタンスによる電圧降下が十分に小さく、誘起電圧も必要以上に低いことがわかる。したがって、図 1(a) の上部に例示したように巻線のターン数を 2 倍にして、同期インダクタンスが 4 倍、誘起電圧が 2 倍になったとしても、十分 12 V の直流電源で駆動することができると考えられる。更に表 2 に示したように、モータ効率の最適化を図るためパーミアンス係数 $p_u = \ell_m / \ell_g$ を 1.67 から 0.882 へ変更すると、各種電圧降下は表 1 右列のようになる。前述のように巻線抵抗や同期インダクタンスの値は 4 倍になるが、パーミアンス係数を調整して誘起電圧を最適化することにより駆動電流を約 30% 減少させることができるため、これらにおけ

表 1 定格出力時の電圧降下
Table 1. Voltage drops at rated output.

Number of winding turns	1	2
$R_{FET} I$ (V _{rms})	0.353	0.240
$R_a I$ (V _{rms})	0.0127	0.0328
$\omega L_a I$ (V _{rms})	0.194	0.560
E (V _{rms})	2.84	4.11
V (V _{rms})	3.21	4.42

表 2 パーミアンス係数を決定するモータ形状
Table 2. Motor parameters to determine permeance coefficient.

Number of windings (turn)	1	2
L	30	30
ℓ_m	5	3.75
ℓ_g	3	4.25

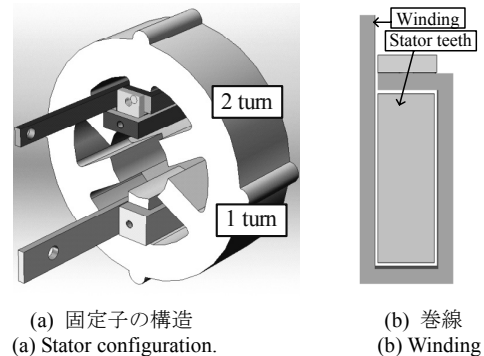


図 1 固定子巻線の構造
Fig. 1. Stator winding configuration.

る電圧降下の増大を 2.5~2.9 倍に抑えることができる。インバータ直流電源電圧を 12 V と想定し、モータに印加できる最大相電圧が 4.90 V_{rms}/相であるとするれば、ターン数 2 のモータは定格 1500 W 出力時に電圧利用率を 90.2 %まで高めることができる。また、200 %過負荷時においても電圧利用率は 97.9 %であり、電圧飽和を来たすことはない。

3. 超高速モータの固定子形状

本モータは車載用のため、高効率化とパワー密度の向上という2つ観点から固定子形状も吟味しなければならない。形状を決定するパラメータとして、図 2 に示す継鉄幅、鉄心外径、鉄心ティース幅を考える。まず、図 3 に鉄心外径と鉄心内径を一定として、継鉄幅を変化させたときの定格出力における損失計算結果を示す。継鉄幅が十分に大きい場合、スロット窓面積が小さくなるため銅損は増加するが、磁束経路を短くできるため固定子鉄損は減少する。逆に、継鉄幅 5 mm 以下では損失が減少するが、継鉄で磁気飽和が生じるため所要のトルクを出力することができない。したがって、継鉄幅の最適値は 6 mm であると判断される。次に、継鉄幅を 6 mm として鉄心内径を固定したまま鉄心外径を変化させたときの損失計算結果を図 4 に示す。鉄心外径を小さくした場合、モータ全体の体格は小さくなり更に磁束経路が短くなるので固定子鉄損も減少する。しかし、スロット窓面積も減少するため、逆に銅損が増加する。ティース幅を狭くすることによって必要なスロット窓面積を確保し銅損を低減することもできるが、スロット開口部の増大によりパーミアンス変動が激しくなるため磁石渦電流損を増加させる。これは効率低下をもたらすだけでなく、発熱による磁石の不可逆減磁を引き起こす原因となるため、ティース幅を小さくすることは避けるべきである。以上を考慮すると、鉄心外形の最適値は 70 mm、ティース幅は 10 mm であると結論づけられる。

図 5 に継鉄幅 6 mm、鉄心外径 70 mm、ティース幅 10 mm とした場合の定格運転時における諸損失（機械損は含まない）を計算した結果を示す。このようにターン数 2 の新規設計されたモータは巻線の銅損が増加するものの、永久磁石における渦電流損や固定子鉄心の鉄損のいずれもが大幅に低減されることがわかる。

4. まとめ

本稿では 12 V 電源で駆動される超高速（1.5 kW、150000 r/min）PM モータにおいて、固定子巻線のターン数、パーミアンス係数、固定子鉄心形状に関する最適化を検討した。数値計算の結果、本モータは従来のモータに対して効率で 1.3 ポイント改善して 87.8 %を達成でき、パワー密度については 73 %向上すると考えられる。今後、試作機により実験的に運転特性を検証する所存である。

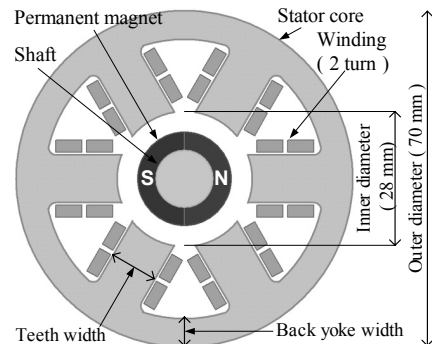


図 2 2 ターン巻線の超高速モータ断面形状
Fig. 2. Cross section diagram of 2-turn ultra high-speed motor.

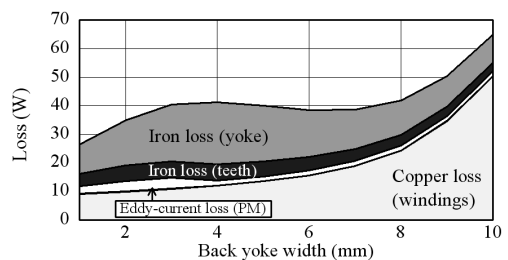


図 3 継鉄幅に対する損失計算結果
Fig. 3. Loss analysis result with respect to back yoke width.

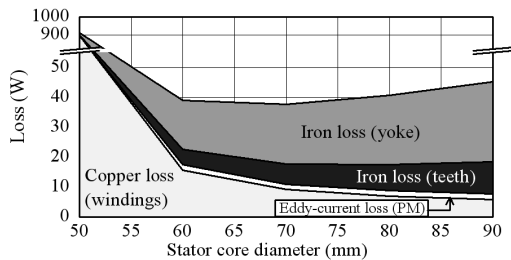


図 4 鉄心外径に対する損失計算結果
Fig. 4. Loss analysis result with respect to iron core outer diameter.

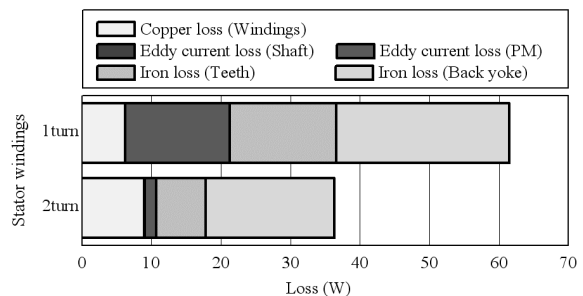


図 5 定格運転時の諸損失（機械損は含まず）
Fig. 5. Losses at rated operation (mechanical loss not included).

文 献

- (1) T. Noguchi, and M. Kano, "Development of 150000 r/min, 1.5 kW Permanent-Magnet Motor for Automotive Supercharger", *PEDS2007-Bangkok*, 2A-03 (2007).
- (2) 鹿野・野口：「150,000 r/min-1.5kW PM モータのパーミアンス係数最適化による効率改善」電学産応部大, R3-7 (平 18)