

# 高パワーレート PM モータの アスペクト比と極対数についての検討

杉浦 功真\* 野口 季彦 (静岡大学)

Study on Aspect Ratio and Number of Pole Pairs of High-Power-Rate PM Motors

Sugiura Koma\*, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

## 1. はじめに

近年、永久磁石 (PM) の性能向上に伴いサーボモータの高性能化が著しく進んでいる。サーボモータに求められる性能のひとつにパワーレートがある。パワーレートはトルクの 2 乗をロータイナーシャで割った値であり、加速度性能を表す指標である。高パワーレートであるほど、モータの加速度は大きい。ここで、トルクは同体積なら、外径を大きくするほうが高トルクを実現できるが、イナーシャはロータ外径の 4 乗に比例する。したがって、同体積であれば、ロータ径が細く、積厚方向に長いモータがイナーシャを低減することができ、高パワーレートに適すると考えられる。しかし、エアギャップ、ブリッジには設計上の制約があるため、細長い形状にすることで背反が生じると考えられる。

また、トルクは極対数に比例する。したがって、極対数を増やすことで、高トルク化でき、高パワーレート化すると考えられる。一方で、モータを製造するうえで、巻線を挿入する必要があるため、スロットオープニングの幅は制約を受ける。このとき、極対数が多い場合にはスロットオープニングの割合が高くなるなどのトレードオフが生じると考えられる。

そこで、本稿では高パワーレートモータに適した積圧とモータ外径のアスペクト比と極対数について検討したので報告する。

## 2. アスペクト比に関する検討

ステータ外径  $D_1$  と積厚  $L$  のアスペクト比  $k$  を下式で定義する。

$$k = \frac{D_1}{L} \quad (1)$$

本節ではこの  $k$  を変化させることによるパワーレートへの影響について検討する。Fig. 1 に 4 極対基本モデルを示す。本モデルは電気学会 D モデルを参考に作成した。また、 $k$  を変化させる場合にも、エアギャップ、ブリッジ、スロットオープニングは一定とした。ここで、イナーシャ  $J$  は下式で表される。

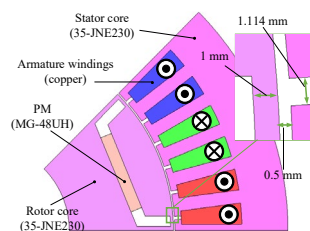
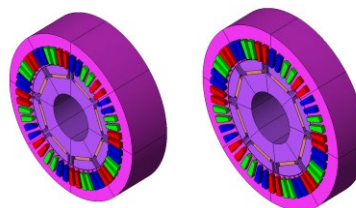


Fig. 1. Cross section of 4-pole-pair basic model.

Table 1. Major specifications of motor.

	Symbol	Model 1	Model 2
Aspect ratio	$k$	3.53	4.94
Inner diameter of rotor (mm)	$D_3$	$\phi$ 60	$\phi$ 67
Outer diameter of rotor (mm)	$D_2$	$\phi$ 132.4	$\phi$ 148.1
Inner diameter of stator (mm)	-	$\phi$ 133.4	$\phi$ 149.1
Outer diameter of stator (mm)	$D_1$	$\phi$ 212	$\phi$ 237
Stack length (mm)	$L$	60	48
Magnet width (mm)	-	27.5	30.8
Magnet thickness (mm)	-	4	4.47
Air gap (mm)	-	0.5	←
Number of slots	-	48	←
Number of turns	-	18	←
Line current (A <sub>amp</sub> )	-	27.51	34.39
Area of slot (mm <sup>2</sup> )	-	123.74	156.07
Volume of copper (mm <sup>3</sup> )	-	$3.56 \times 10^5$	$3.60 \times 10^5$
Volume of magnet (mm <sup>3</sup> )	-	52800	52800
Volume of motor (mm <sup>3</sup> )	-	$1.95 \times 10^6$	$1.95 \times 10^6$



(a) Model 1 ( $k = 3.53$ ). (b) Model 2 ( $k = 4.94$ ).

Fig. 2. 3D models of investigated motors.

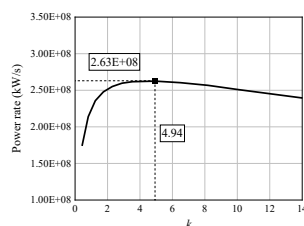


Fig. 3. Relationship between power rate and  $k$ .

$$J = \frac{\pi}{32} \rho \cdot L \cdot (D_2^4 - D_3^4) \quad (2)$$

ただし、密度  $\rho$ 、ロータ外径  $D_2$ 、ロータ内径  $D_3$  とする。また、パワーレートは下式で表される。

$$\frac{dP}{dt} = \frac{T^2}{J \times 10^{-3}} \quad (3)$$

(2)、(3)式よりパワーレートはロータ外径と積圧、トルクに依存する。Table 1, Fig. 2 に  $k=3.53$ ,  $k=4.94$  におけるモータの主要諸元および、3Dモデルを示す。このとき、Table 1 に示すように、モータ体積、磁石、銅の量が等しくなるように設計を行った。モータ外径と積圧のアスペクト比を変化させたとき、スロット面積も変化する。そこで、全てのモデルで電流密度が等しくなるよう、アスペクト比に合わせて電流値を変化させた。電磁界解析には JMAG-Designer 21.0 を使用した。Fig. 3 にアスペクト比  $k$  とパワーレートの関係を示す。Fig. 3 より  $k=4.94$  のとき、パワーレートが最大になることがわかる。これより、高パワーレート化するために、最適なアスペクト比が存在することがわかる。

### 3. 極対数に関する検討

IPM モータのトルクは下式で表される。

$$T = P_n \{ \Psi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \quad (4)$$

したがって、トルクは極対数  $P_n$  に比例するので極対数が増加することで、大トルク化し、高パワーレート化すると考えられる。一方で、スロット数が増加するため、ロータとステータの表面積が減少する。また、高パワーレート化するために、イナーシャを低下させる手法として、ロータ内径  $D_3$  を拡大し、中空構造にする方法がある。そこで、前節で求めた、最適なアスペクト比  $k=4.94$  を用いて、2極対、6極対のモデルを作成した。その後、ロータ内径を拡大し、中空構造化する効果を検討する。Table 2 に解析条件、Fig. 4 に各極対数における、内径を拡大していないモデルと内径を拡大し、パワーレートが最大となるモデルの無負荷時の磁束密度のベクトルプロットを示す。Fig. 4 より極対数が増加すると、ロータの内径側の磁束密度が低下していることが分かる。Fig. 5 に各極対数において、内径を拡大した場合のパワーレートの変化を示す。Fig. 5 より4極対において、パワーレートが最も高くなっていること、ロータ内径を拡大することで、パワーレートが向上することが分かる。また、極対数が多くなるとパワーレートが最大となるロータ内径が大きくなることがわかる。これは極対数が増加するとロータの内径側の磁束密度が低下しており、q軸磁路としての役割を果たしていないためであると考えられる。

### 4. まとめ

本稿では、高パワーレート PM モータに適切な積圧とモータ径のアスペクト比と極対数について検討した。解析結

Table 2. Analysis conditions.

	2 pole pairs	4 pole pairs	6 pole pairs
Number of slots	24	48	72
Number of turns	36	18	12

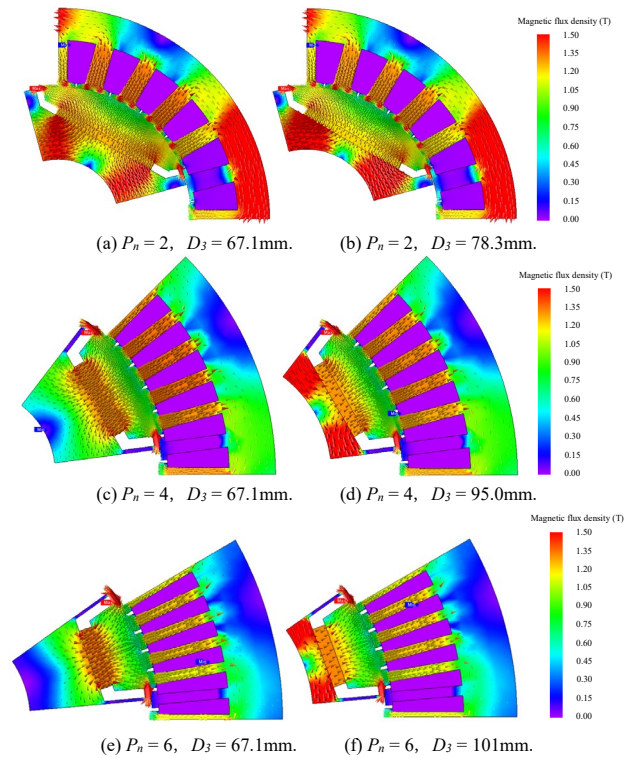


Fig. 4. Analysis results of magnetic flux density.

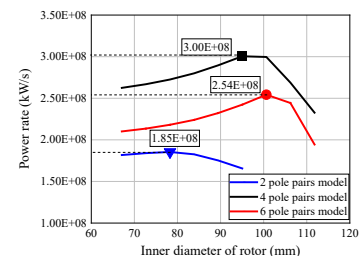


Fig. 5. Power rate with respect to  $D_2$ .

果から、モータの体積が等しい場合には、パワーレートが最大となるアスペクト比と極対数が存在することを確認した。また、ロータ内径を拡大し、中空ロータ構造を用いることで、パワーレートが向上することを確認した。最適なアスペクト比、極対数はモータジオメトリに応じて変化すると考えられる。したがって、ジオメトリに応じた最適なアスペクト比と極対数を検討することはモータの高パワーレート化に有効であると言える。

## 文 献

- (1) 筒井 幸雄:「ロボット用電動機の開発動向」, 電気学会誌, Vol.126, No.11 p.735-737 (2006)
- (2) 橋 英之, 真田 雅之, 森本 茂雄, 井上 征則:「高電流密度時の PM モータにおける外径と積厚の比がトルクに及ぼす影響の検討」, パワーエレクトロニクス学会誌, Vol.37, p.228 (2012)