

# 低価格・高効率を志向した永久磁石形同期機の設計法

奥山 吉彦(おくやま よしひこ)

## ① まえがき

1960年代以降に出現した希土類永久磁石は、現在もよく使用されているフェライト磁石に比べ残留磁束密度が1Tを超えるなど、磁石特性が格段に優れている。したがって、回転機の体格を決める一つの要素である磁気装荷を従来機と同程度に取ることが可能となった。

従来形同期機は一般に回転子に磁極があり、界磁巻線に直流電流を流して必要磁束を作るので銅損が生じる。一方、永久磁石形同期機は磁極に永久磁石を使用しているため、銅損を発生することなく必要磁束が作られるので高効率となる。この二点が、永久磁石形同期機が注目され比較的大きな容量まで製品化されだした理由である。

本稿では、永久磁石形同期機の基本的設計法とその最適化のための考慮点について述べる。

## ② 永久磁石形同期機設計の基本

電池と違って、磁石はいくら使っても消耗しない。磁石が鉄片を吸い付ける現象でいえば、鉄片を吸い付けることにより磁石が有するエネルギーは減少するが、その分鉄片の持つエネルギーが増大する。エネルギーの総和は常に一定なので、磁石が有するエネルギーの分担が変わるだけである。<sup>(1)</sup>これがいくら使っても消耗しない理由である。

この磁石が作る磁束を利用した回転機が永久磁石形同期機である。

### 2.1 フェライト磁石と希土類永久磁石の特性比較

希土類磁石は、高性能であるため機器の小形化や省エネルギーの目的で採用され、その生産高(質量)は年率20%で伸長している。希土類磁石では、サマリウム-コバルト磁石とネオジム-鉄-ボロン磁石が代表的である。

表1<sup>(2)</sup>は、フェライト磁石と対比させて、この2種類の希土類磁石の特性を示したものである。残留磁束密度、保持

表1 希土類磁石の代表的特性

特性項目	磁石種類	フェライト磁石 (乾式異方性) <sup>*1</sup>	サマリウム-コバルト磁石 <sup>*2</sup>		ネオジム-鉄-ボロン磁石 <sup>*3</sup>	
			特性値	対フェライト磁石 <sup>*4</sup>	特性値	対フェライト磁石 <sup>*4</sup>
残留磁束密度 $B_r$	(T)	0.2 ~ 0.235	1.02 ~ 1.12	4.9	1.33 ~ 1.38	6.2
保持力 $H$	$bH_c$ <sup>*5</sup> (kA/m)	143 ~ 159	716 ~ 844	5.2	836 ~ 1,035	6.2
	$iH_c$ <sup>*6</sup> (kA/m)	239 ~ 279	1,432以上	5.5以上	875以上	3.4以上
最大エネルギー積 ( $BH$ ) max (MGOe)		0.9 ~ 1.2	24 ~ 30	25.7	42 ~ 46	41.9
温度係数	$B_r$ (%/K)	- 0.18	- 0.03	0.17	- 0.10	0.56
	$iH_c$ (%/K)	0.22	-	-	- 0.57	-
キュリー温度 $T_c$	( )	450	820	-	365	-
クニック点 $iH_k$ <sup>*7</sup>	(kA/m)	-	680 ~ 1,300	-	300 ~ 1,000	-
リコイル比透磁率 $\mu_r$		1.1 ~ 1.2	1.02	-	1.05	-
電気比抵抗	( $\mu \cdot \text{cm}$ )	$10^4$ 以上 <sup>*8</sup>	84	0.0084	180 ~ 200	0.18 ~ 0.2
密度	( $\text{g/cm}^3$ )	4.6 ~ 4.9	8.4	1.77	7.5	1.58

\*1 : (社)日本電子材料工業会「磁石のはなし」による。  
 \*2 : 信越化学工業(株)R26HS(サマリウム系超高保持力グレード)による。  
 \*3 : 信越化学工業(株)N45(ネオジム系高特性タイプ)による。  
 \*4 : 特性中央値の対フェライト比。

\*5 :  $bH_c$  は、 $B-H$  特性上の  $B=0$  における磁界の強さ。  
 \*6 :  $iH_c$  は、磁化の強さ特性上の  $B=0$  における磁界の強さ。  
 \*7 :  $iH_k$  は、磁化の強さ特性上の  $B=0.9B_r$  における磁界の強さ。  
 \*8 : 住友特殊金属(株)のカタログ「永久磁石」による。



奥山 吉彦

誘導機の電気設計, 回転電気機械の技術開発に従事。現在,(株)富士電機総合研究所回転機技術開発研究所主幹技師。

図1 希土類磁石の特性

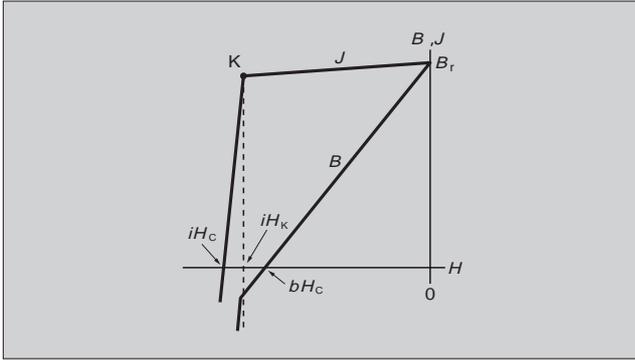
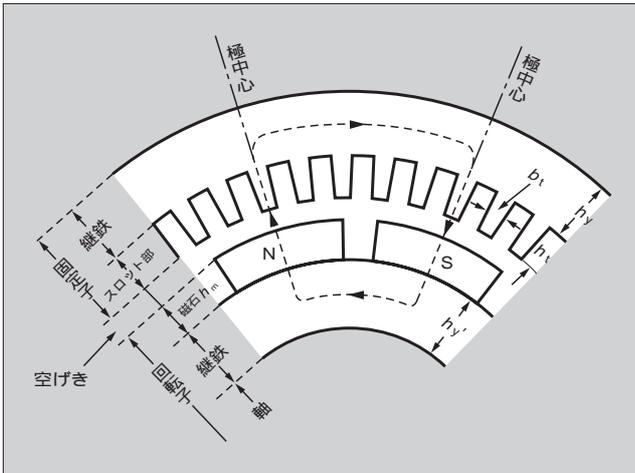


図2 永久磁石形同期機の断面と磁気回路



力および最大エネルギー積はフェライトに対し数倍向上している。永久磁石は温度が上昇すると減磁する。減磁には、磁石温度が元に戻ると  $B-H$  特性も元に戻る可逆減磁と、元に戻らない非可逆減磁がある。表1の温度係数は可逆熱減磁の係数であり、両希土類磁石ともフェライト磁石に比べ良好な値となっている。

一方、非可逆減磁は磁石温度がある一定温度を超えた場合や、運転点が磁化の強さ  $J$  の特性(図1)のある磁界の強さで急激に折れ曲がる点〔クニック(K)点〕を超えた場合に発生する。磁石は小さな磁石(磁区)の集合体であり、K点の右側ではこれら磁区が一方向に向いているが、K点を超える外部起磁力が印加されたり過大温度を経験すると、磁区の一部が逆向きになったり  $90^\circ$  方向が違うものが生じ、元の特性に戻らなくなる。これが非可逆減磁の物理的な意味である。表1にはK点を磁界の強さで示しているが、近年この特性がきわめて良好な希土類磁石が製品化されている。

希土類磁石を使用するとき考慮しなければならない点は、フェライト磁石に比べ電気抵抗が低いことである。磁石を回転子表面に張り付ける方式(SPM: Surface Permanent Magnet)では、電機子スロットが作る脈動磁束密度(スロットリップル)により比較的大きな表面損失が発生するので注意が必要である。

2.2 永久磁石形同期機の設計法<sup>(2)</sup>

永久磁石形同期機は磁石の種類と寸法から決まる界磁起磁力一定の同期機となる。この条件を導入すれば、従来形同期機の設計法が永久磁石形同期機にも適用できる。

2.2.1 磁路の飽和特性 ----- 無負荷電圧の求め方 -----

図2は代表的な永久磁石形同期機(SPM)の構成を示す断面図である。図中の破線は磁路を示している。すなわち、N極磁石から出た磁束は空けきを通り、固定子鉄心を通り、向きを逆にして空けきを通ってS極磁石へ流れ込む。回転子継鉄部では、磁束は図示のS極からN極へ流れ閉回路が形成される。この閉回路にアンペアの周回積分の法則を適用すると式1が求まる。なお、閉回路の1/2の起磁力で考える。

$$\frac{B_r}{\mu_r \cdot \mu_0} \cdot h_m = \frac{B_m}{\mu_r \cdot \mu_0} \cdot h_m \cdot k_c + \frac{B_g}{\mu_0} \cdot l_y \cdot k_c + AT_{Fe} \quad (A) \quad (1)$$

ここで、

- $B_r$  : 磁石の残留磁束密度 (T)
- $B_m$  : 磁石内の磁束密度 (T)
- $B_g$  : 空けきの磁束密度 (T)
- $\mu_r$  : 磁石のリコイル比透磁率 (= 1.05)
- $\mu_0$  : 真空の透磁率 (=  $4 \cdot 10^{-7}$ )
- $h_m$  : 磁石の厚さ (m)
- $k_c$  : カータ係数
- $l_y$  : 空けき長 (m)
- $AT_{Fe}$  : 空けきと磁石部を除く磁気回路の所要起磁力 (A)

を示す。

永久磁石形同期機は界磁起磁力が一定であるから、いわゆる無負荷飽和特性は存在しないが、無負荷誘導電圧を求めるための磁路の飽和特性が従来形同期機の無負荷飽和特性に相当する。この磁路の飽和特性を求めるには、まず各磁路、例えば歯鉄部や継鉄部などの磁束密度を空けき磁束密度  $B_g$  の関数として表す。図2において磁石間の漏れ磁束は少ないので無視すると、 $B_m = B_g$  (T) が成立する。

したがって、空けきと磁石の所要起磁力は式(2)、式(3)となる。

$$AT_g = \frac{B_g}{\mu_0} \cdot k_c \cdot l_y \quad (A) \quad (2)$$

$$AT_m = \frac{B_g}{\mu_r \cdot \mu_0} \cdot k_c \cdot h_m \quad (A) \quad (3)$$

また、歯鉄部や継鉄部の磁束密度と所要起磁力は以下の式で表せる。

$$B_t = \frac{n}{b_t} \cdot B_g \quad (T), \quad AT_t = H(B_t) \cdot h_t \quad (A) \quad (4)$$

$$B_y = \frac{b_m}{2h_y} \cdot B_g \quad (T), \quad AT_y = H(B_y) \cdot l_y \quad (A) \quad (5)$$

$$l_y = \frac{(D_1 + 2h_t)}{2p} \cdot k_y \quad (m)$$

ここで、

- $B_t$  : 歯鉄部磁束密度 (T)

- $n$  : 固定子溝ピッチ (m)
- $b_t$  : 固定子歯鉄幅 (m)
- $AT_t$  : 固定子歯鉄起磁力 (A)
- $H(B_t)$  : 固定子鉄心の  $B_t$  に対する磁界の強さ (A/m)
- $h_t$  : 固定子歯鉄高さ (= 溝高さ) (m)
- $B_y$  : 固定子継鉄磁束密度 (T)
- $h_y$  : 固定子継鉄厚さ (m)
- $b_m$  : 磁石幅 (m)
- $AT_y$  : 固定子継鉄起磁力 (A)
- $H(B_y)$  : 固定子継鉄の  $B_y$  に対する磁界の強さ (A/m)
- $l_y$  : 継鉄磁路長 (m)
- $D_t$  : 固定子鉄心内径 (m)
- $p$  : 極対数
- $k_y$  : 継鉄磁束の分布を考慮した係数

を示す。

なお回転子継鉄部の所要起磁力に関しては、式5のそれぞれの値を回転子に対応させれば同様に求められる。

例えば、 $B_g$  を0.1Tごとに式2)-(5)にて所要起磁力を計算し、縦軸に空げき磁束密度を、横軸に全所要起磁力をプロットすると図3のような磁路の飽和特性が得られる。図中一点鎖線で示す直線は式1の左辺の磁石起磁力を示す。したがって、この起磁力と磁路の飽和特性の交点が無負荷運転時の空げき磁束密度となる。図の例では、 $B_g = 0.84T$ である。なお、空げきと磁石の所要起磁力の全所要起磁力に占める割合が高いので、磁路の飽和特性はほとんど直線に近い。したがって、概略の空げき磁束密度を求めるには、次式を用いると便利である。

$$B_g \approx \frac{h_m}{h_m + k_c} \cdot B_t \text{ (T)} \dots\dots\dots (6)$$

一方、 $B_g$  の空間的分布はほぼ方形波であるから基本波磁束密度はフーリエ級数展開により、 $B_g$  をポールピッチ (m) とすると次式となる。

$$B_t = \frac{4}{\pi} \cdot B_g \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{b_m}{n}\right) \text{ (T)} \dots\dots\dots (7)$$

この磁束密度から毎極の基本波磁束数  $\Phi_p$  が求まり、三相の線間誘導電圧  $U$  は式8で表される。

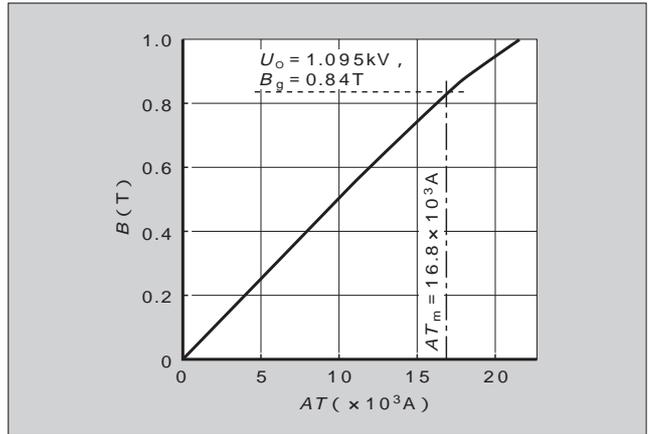
$$U = \sqrt{3} \cdot 1.57 \cdot \frac{N_t \cdot n_s}{a} \cdot n \cdot l \cdot D_t \cdot B_g \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{b_m}{n}\right) \cdot K_{w1} \cdot 10^{-2} \text{ (V)} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、

- $N_t$  : 固定子溝数
- $n_s$  : 毎溝導体数
- $a$  : 固定子巻線並列回路数
- $n$  : 回転速度 (min<sup>-1</sup>)
- $l$  : 鉄心長
- $D_t$  : 固定子鉄心内径
- $K_{w1}$  : 巻線係数

を示す。

図3 磁路の飽和特性



2.2.2 負荷時電圧特性

負荷電流が流れると固定子漏れリアクタンスや抵抗により電圧降下が生ずるので、端子電圧  $U$  を発生させるためには内部誘導電圧  $E$  は電圧降下分だけ大きくななければならない。この電圧  $E$  を発生させるための界磁起磁力  $A_R$  は図3の無負荷飽和特性から求められ、 $A_R$  の位相は  $E$  に対し90°進む。また負荷電流が流れ、電機子反作用  $A_g$  による電圧降下が生じる。

$$A_g = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot A_1 \cdot K_{w1} \text{ (A)} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $A_1$  は電気装荷 (A/m) で、 $I_1$  を電機子電流とすると、 $A_1 = I_1 \cdot N_t \cdot n_s / a$  となる。この起磁力  $A_g$  を  $A_R$  にベクトル的に加算すると負荷時に必要な界磁起磁力  $A_2$  が得られる。端子電圧を仮定し  $A_2$  が磁石起磁力  $A_m$  に等しくなるまで反復計算することになる。図4は無負荷飽和特性上で負荷時端子電圧を図式的に求める方法を示すものである。

2.2.3 永久磁石形同期機の等価回路

前項では負荷時端子電圧の図式表示について述べた。ここでは永久磁石形同期機のリアクタンスおよび抵抗を求め、等価回路を作り負荷時端子電圧を求める方法について述べる。

(1) 電機子反作用リアクタンス

負荷電流  $I_1$  が電機子巻線に流れることにより生ずる1極あたりの起磁力  $AT$  (A) は、 $q$  を毎極毎相の溝数とすると、

$$AT = \frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{n_s}{2} \cdot q \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{I_1}{a} \cdot K_{w1} \text{ (A)} \dots\dots\dots (10)$$

この起磁力によって空げきに生ずる磁束密度  $B$  は、

$$B = \frac{\mu_0 \cdot AT}{k_c \cdot h_m + h_m / \mu_r} \text{ (T)} \dots\dots\dots (11)$$

1相あたりの直列導体数は  $W_1 = n_s \cdot q \cdot 2p / 2a$  ( $2p$ : 極数) であるから、鎖交磁束量  $\Phi$  は、

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \cdot B_t \cdot l \cdot W_1 \cdot K_{w1} \text{ (Wb)} \dots\dots\dots (12)$$

したがって、電機子反作用リアクタンス  $X_a$  は次式となる。

図4 負荷時端子電圧の図式表示

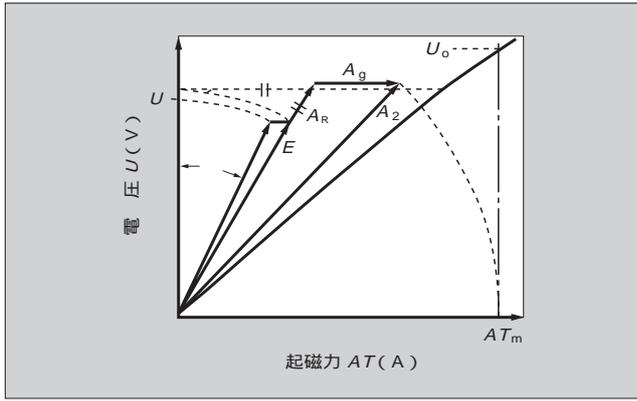
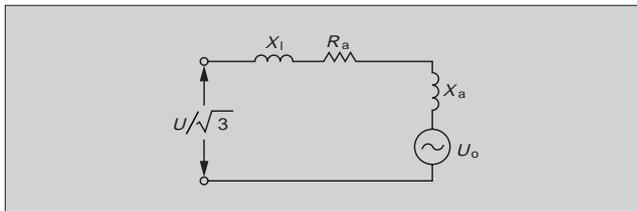


図5 永久磁石形同期機の等価回路



$$X_a = 2 \cdot f \cdot \mu_0 \left( \frac{W_1 \cdot K_{w1}}{p} \right)^2 \cdot 3 \cdot \frac{D_1 \cdot l}{k_c \cdot h_m / \mu_r} \quad (13)$$

(2) 等価回路

従来形同期機の等価回路は電機子漏れリアクタンス  $X_l$ 、抵抗  $R_a$ 、界磁巻線漏れリアクタンス  $X_l$ 、抵抗  $R_l$  および制動巻線漏れリアクタンス  $X_k$  で示される。一方、永久磁石形同期機では、磁石表面あるいは保持リング表面の渦電流回路の電流が基本波電流の値を左右しないので、図5に示す単純な回路となる。なお、図中の  $U_0$  は無負荷誘導電圧を示す。この等価回路を用い力率  $\cos$  を考慮した電流を与えたときの端子電圧を求めれば、図4の図式表示の数値計算となる。

③ 永久磁石形同期機最適化の設計考慮点

1997年10月24日から施行された米国のエネルギー政策法には、かご形誘導電動機の効率に高い基準が設けられているが、これは地球温暖化を防止すること、すなわち省エネルギーを狙いにしたものである。高性能な希土類永久磁石を採用した低価格で界磁損失のない高効率な永久磁石形同期電動機は、正にこの主旨に沿った電動機である。希土類磁石の価格はフェライト磁石に比べけた以上高いので、希土類磁石の使用量を最小にし、しかも機能的にも性能的にも問題のない設計はいかにあるべきか、主要点につき以下に述べる。

3.1 IPMの極間漏れによる磁石磁束利用率の低下

小容量永久磁石形同期機は、すでに多数製作され運転されている。この節では、図6(a)の典型的なIPM (Inner Permanent Magnet) 方式の極間漏れによる磁束利用率の低

下について述べる。磁石両端では、磁束は磁石外径部の薄いケイ素鋼板を通して隣接する極性の異なる磁石へ周方向へ流れ、磁気抵抗の大きい空げきを通して電機子へは流れにくくなる。すなわち磁束利用率が低下する。薄いケイ素鋼板の飽和特性を考慮して、空げき磁束密度分布を定量的に解析する。図6.bは各部の磁束密度および寸法を示す図である。電機子鉄心などの磁路の起磁力は無視できるとすると、薄いケイ素鋼板部の周方向磁束の起磁力の0からxまでの積分値は空げき起磁力に等しいので次式が得られる。

$$\int_0^x H_x dx = \frac{B_g}{\mu_0} \cdot k_c \cdot h_s = \frac{B_r}{\mu_r \cdot \mu_0} \cdot h_m - \frac{B_m}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot h_m \cdot k_c \quad (14)$$

$$B_m dx + (B_x + \frac{dB_x}{dx} \cdot dx) h_s = B_x h_s + B_g dx \quad \text{が成立するので、}$$

$$\frac{dB_x}{dx} = \frac{1}{h_s} (B_g - B_m) = \frac{1}{h_s} \left( B_g + \frac{\mu_r \cdot k_c}{h_m} \cdot B_r - B_r \right) \quad (15)$$

素鋼板の  $B-H$  特性を図7の破線で近似し、式16で表す微分方程式を解くと、 $B_x, B_g$  は式17, 式18となる。

$$B = \mu_s \cdot \mu_0 \cdot H_x + B_0 \quad (T) \\ \mu_s = 5.37, \mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}, B_0 = 1.73 \quad (16)$$

$$B_x = A \cdot x + B \cdot x^2 + B_0 \quad (T) \quad (17)$$

$$B_g = \frac{1}{\mu_s} \cdot \left( A \cdot x + B \cdot x^2 + \frac{B_r}{h_s} \right) \quad (T) \quad (18)$$

$$B_m = B_r - \frac{\mu_0 \cdot k_c}{h_m} \cdot B_g \quad (T) \quad (19)$$

$$^2 = \frac{h_m + \mu_r \cdot k_c}{\mu_s \cdot k_c \cdot h_s \cdot h_m} \quad (1/m^2) \quad (20)$$

境界条件から係数  $A, B$  を求め近似を用いると、 $B_g$  は式21となる。

$$B_g \approx \frac{B_r}{\mu_s \cdot k_c \cdot h_s} \cdot (1 - x^2) \quad (21)$$

式21の磁束密度分布の基本波波高値をフーリエ級数展開して求める。ただし  $^2 = ( / )^2 \cdot ^2$  に換算する。

$$B_1 \approx \frac{4}{\mu_s \cdot k_c \cdot h_s} \cdot \left\{ \sin \frac{b_m}{2} \cdot \frac{b_m}{2} - \frac{1}{a^2 + 1} \left( \cos \frac{b_m}{2} \cdot \frac{b_m}{2} + \sin \frac{b_m}{2} \cdot \frac{b_m}{2} \right) \right\} \cdot \frac{B_r}{\mu_s \cdot k_c \cdot h_s} \quad (22)$$

極間の漏れがないときの方形波の基本波波高値  $B_1'$  は式6, 式7から次式となる。

$$B_1 = \frac{4}{\mu_s \cdot k_c \cdot h_s} \cdot B_g \cdot \sin \frac{b_m}{2} \cdot \frac{b_m}{2} \approx \frac{4}{h_m + \mu_r \cdot k_c} \cdot B_r \cdot \sin \frac{b_m}{2} \cdot \frac{b_m}{2} \quad (23)$$

磁石磁束利用率を  $B_1/B_1'$  と定義すると、式22, 式23からは式24で与えられる。

$$= 1 - \frac{1}{a^2 + 1} \left( \cot \frac{b_m}{2} \cdot \frac{b_m}{2} + 1 \right) \quad (24)$$

55 kW, 1,800 min<sup>-1</sup>, 6極機の永久磁石同期電動機の磁束利用率について具体的に検討した。この電動機の基本波磁束密度  $B_1$  は約 1T,  $b_m/l$  は 0.85 の IPM 方式 [図6(a)] である。 $B_1 = 1T$  としたときの接着剤方式 SPM (接着剤厚さ極小), バインド方式 SPM (ガラスバインドなど) および当該機方式 (IPM) の3方式の  $b_m/l$  と磁石使用量の関係を求めた。図8は当該機の磁石使用量を1として、3

図6 IPM方式永久磁石形同期機

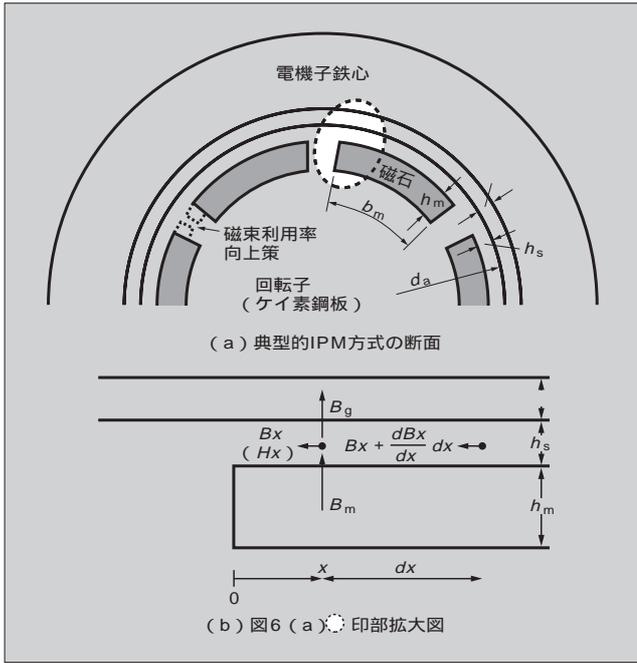
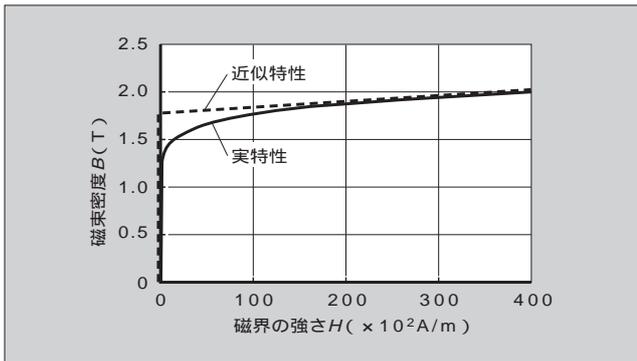


図7 ケイ素鋼板の B-H 特性



方式の磁石使用量を単位法で示したものである。この図から接着剤 SPM 方式では極間漏れがなく、永久磁石形同期機として理想的方式である。最適な厚さのバインドテープがあるものとして算出したバインド方式 SPM の使用量が接着剤 SPM より大きい理由は、バインドの厚さだけけき長が大きくなるからである。式(21)-(24)を用いて算出した IPM 方式の磁石使用量が接着剤方式 SPM のそれより大きい理由が極間漏れである。また  $b_m/ \leq 0.8$  で使用量が SPM バインド方式より増加するのは、機械強度的に  $h_s$  が大きくなり、極間漏れが増加するためである。希土類磁石は高価なので、極間部にけき層を設けた磁束利用率向上策〔図6(a)の破線〕などが採用される。

SPM の場合の磁石使用量  $W$  は、 $\rho_m$  を磁石の比重、 $2p$  を極数とすると次式で示される。

$$W = 2p \cdot \rho_m \cdot b_m \cdot h_m \cdot \frac{1}{4 \cdot \sin(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{b_m}{\tau})} \cdot \frac{B_1}{B_r} \dots \dots \dots (25)$$

したがって、 $W$  が最小となる  $(b_m/ )_{min}$  は  $B_1/B_r$  に依存し、 $B_1/B_r$  が小さくなると  $(b_m/ )_{min}$  は小さく、 $B_1/B_r$

図8 磁石使用量と  $b_m/$  の関係

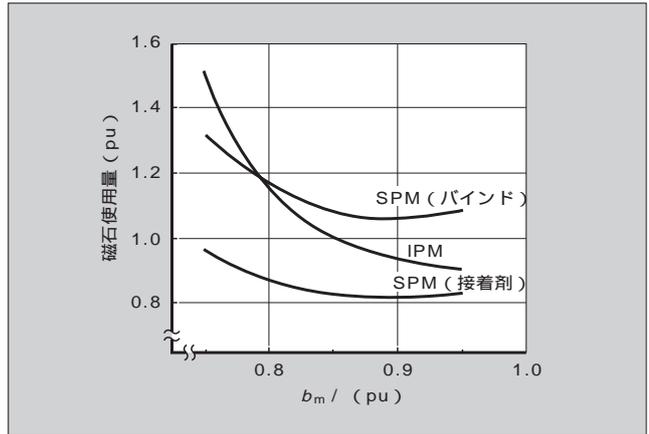
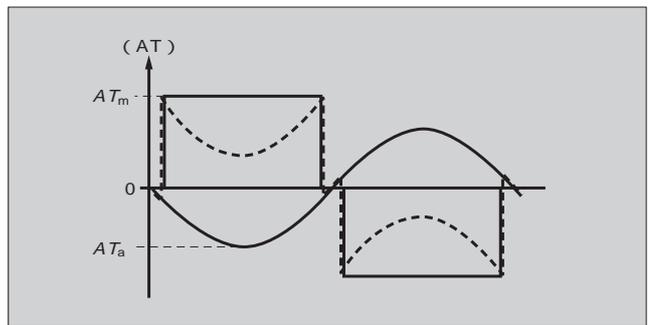


図9 短絡電流の起磁力



が大きくなると、 $(b_m/ )_{min}$  は大きくなる。 $B_1/B_r \approx 1$  を採用すると、図8のように  $(b_m/ )_{min} \approx 0.9$  となる。

磁石厚は使用量だけではなく、3.2節の短絡電流による磁石の永久減磁にも関係するので、両者を勘案して決める必要がある。

3.2 短絡電流による磁石の永久減磁

永久磁石形同期機の端子部で短絡が発生すると短絡電流が流れる。この短絡電流による起磁力 ( $AT_a$ ) は図9に示すように磁石の起磁力 ( $AT_m$ ) と逆向きの起磁力となる。図には磁石の起磁力を方形波で、短絡電流による逆向きの起磁力を正弦波で示し、破線は  $AT_m - AT_a$  を示す。この状態における磁石の磁束密度  $B_m$  および磁界の強さ  $H_m$  は式(26)になる。

$$\frac{B_m}{\mu_r \cdot \mu_0} \cdot h_m \cdot k_c = H_m \cdot h_m = \frac{B_r}{\mu_r \cdot \mu_0} \cdot h_m - \frac{B_g}{\mu_0} \cdot k_c - AT_{Fe} - AT_a \dots (26)$$

ここで、 $AT_a$  は短絡電流による起磁力を示し、正弦波分布の波高値を表す。この点  $P_m (B_m, H_m)$  を磁石の B-H 特性にプロットして図10に示す。図において  $H_a = AT_a/h_m$ 、 $P_c$  は電動機磁気回路のパーミアンス係数である。この点  $P_m$  が K 点を超え  $P_m'$  になる  $H_a/h_m$  が印加されると、短絡電流が消滅しても元の無負荷運転点  $P_0$  に戻らず  $P_0'$  になる。この現象を磁石の永久減磁という。短絡電流は交流対称分と直流分からなり、直流分は時間とともに減衰するので、この減衰も考慮して永久減磁を検討する必要がある。なお IPM 方式の場合、磁石両端外径側の薄いケ

図 10 短絡時の動作点

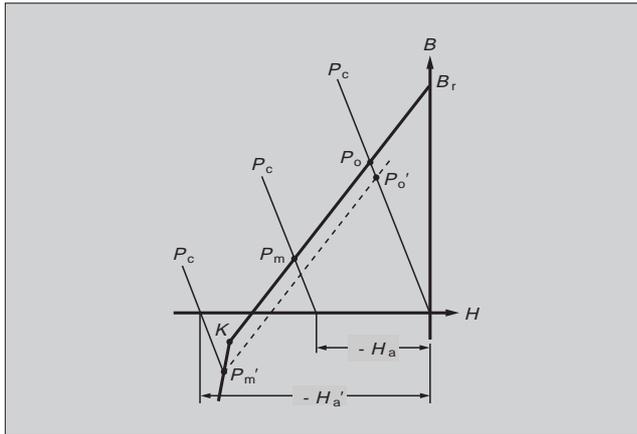
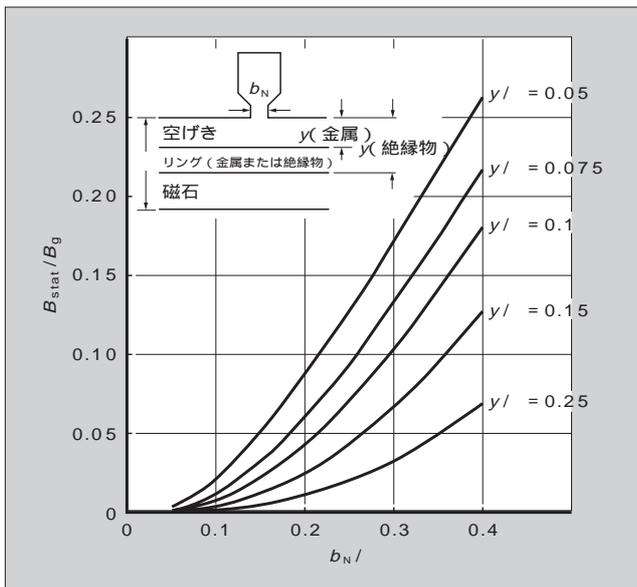


図 11 スロットリップルの大きさ



イ素鋼板部は周方向には磁氣的に飽和しているので減磁に対する効果はないが、極中心のケイ素鋼板部で磁束密度の緩和が生じるので SPM 方式より多少有利となる。

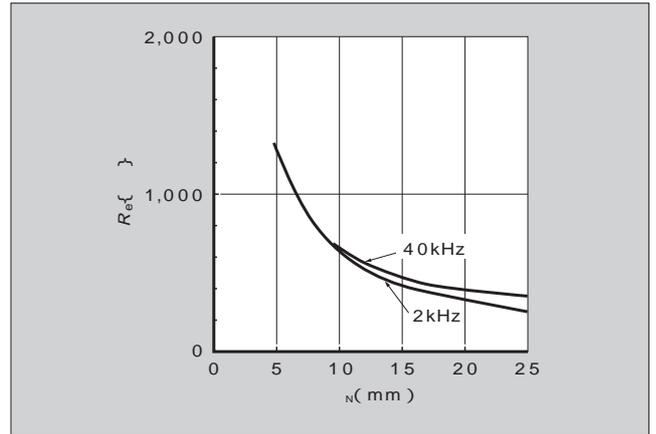
3.3 SPM 方式の回転子表面損<sup>(4)</sup>

SPM 方式の場合、永久磁石として希土類磁石の固有抵抗がフェライト磁石に比較し非常に小さいので、磁石表面は固定子スロットによるスロットリップルと鎖交し、渦電流が流れ損失が発生する。非磁性導電性金属の磁石保持リングを装備する高速永久磁石形同期機の場合には、この損失は保持リングに発生する。磁石はある一定温度を超えると永久減磁を生じるので、特に磁石や磁石近傍に発生する損失と磁石温度の精度よい定量化は必要不可欠である。

さて、磁石または保持リング表面におけるスロットリップル  $B_{stat}$  (T) は  $b_N$  をスロット幅、 $y$  を電機子鉄心表面から磁石（または金属保持リング）表面までの距離とすると空けき磁束密度  $B_g$  に対する割合  $B_{stat}/B_g$  は、図11で与えられる。

$N_1$  を固定子スロット数、 $n$  を回転速度 ( $s^{-1}$ ) とすると、

図 12  $R_e(\ )$  (ネオジウム - 鉄 - ボロン磁石の場合)



回転する磁石表面あるいは保持リング表面は周波数  $f = N_1 \times n$  (Hz) で、この磁束と鎖交するので表面には渦電流が流れる。この渦電流は  $B_{stat}$  を減じるように作用するが、この影響は小さいので無視しても損失値に大きな違いは生じない。

を磁石または保持リングの導電率、 $\mu_1$  を磁石または保持リングの比透磁率、 $N$  をスロットピッチ (m)、 $\omega = 2\pi f$  とすると、単位表面積あたりの損失  $P$  は式27で示される。

$$P = \frac{1}{2} \cdot \frac{(B_{stat} \cdot f \cdot N)^2}{2R_e(\ )} \text{ (W/m}^2\text{)} \dots\dots\dots(27)$$

$$\text{ここで、} \omega^2 = \left(\frac{2\pi}{N}\right)^2 \cdot j \frac{1}{2}, \quad \frac{1}{R_e(\ )} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \mu_1 \cdot \dots}}$$

ネオジウム - 鉄 - ボロン磁石の  $\mu_1 \approx 0.5 \cdot 10^6$  (S/m) であるから、 $R_e(\ )$  は図12となる。

4 あとがき

永久磁石形同期機の基本的設計法と、経済的にも性能的にも最適な永久磁石形同期機とするための考慮点について理論的に述べた。本稿が設計技術者に多少でも参考になれば幸いである。

本稿をまとめるにあたり、多大なご指導をいただいた関東学院大学森安正司教授に深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- (1) 森安正司：希土類磁石の特性，電気評論，No.4 (1998)
- (2) 奥山吉彦・森安正司：永久磁石形同期機の設計法，電気学会回転機研究会資料，RM-97-25 (1997)
- (3) 小貴天ほか：電機設計法への最適化数値計算の導入，電気学会回転機研究会資料，RM-98-132 (1998)
- (4) Hausberg, V.; Moriyasu, S.: Tooth-Ripple Losses in Highspeed Permanent Magnet Synchronous Machines, 電気学会論文誌 D, No.11 (1998)



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。