

逆突極性を改善した埋込型 永久磁石式同期電動機

小暮 晴美* 篠原 勝次** 前田 朋也***

INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR HAVING IMPROVED INVERSE SALIENCY

Haruyoshi KOGURE, Katsuji SHINOHARA and Tomoya MAEDA

Recently, Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) are very favorite by their excellent performances contributing to energy-saving, material-saving and cost-saving. Nowadays, they have been applying to the high power machines or the high speed machines as the power source of high speed railways and electric vehicles. In these cases, the effect of centrifugal force is very serious. So, interior type PMSM (IPMSM) have been under adoption. But, the conventional type IPMSM usually shows the inverse saliency which cause a narrow width of current control. In this report, a novel trial to improve the inverse saliency had been brought up.

Keywords: permanent magnet synchronous motor, interior permanent synchronous magnet motor, saliency ratio, inverse saliency,

1. はじめに

近年の省資源、省エネルギー、高性能化、コスト削減に対する社会的要請には非常に大きなものがあり、電動機の世界でも小型のサーボモータに端を発した永久磁石式同期電動機（しばしばPMS

Mと略記）化による交流電動機の小型化高性能化の流れは確固たるものとなり、既に小型電動機の領域から中型電動機の領域に迄至り、現在では数100Kw級の世界に迄広がると共に、新幹線向けや、電気自動車、ハイブリッドカー向けの様な高速の用途への適用にも急速な拡がりを見せている。

この様な、大型化、高速化の過程で大きな問題となるのが遠心力の問題である。その為、この分野に於ける最近の技術的な傾向の一つは、これ迄ロータの表面に主として接着によつて配置していた磁石をロータの内部に収容する、いわゆる「埋込型永久磁石式同期電動機（しばしばIPMSMと

2001年8月31日受理

* 博士後期課程システム情報工学専攻

** 電気電子工学科

*** 博士前期課程電気電子工学専攻

略記)」化である。

しかしながら、PMSMを埋込磁石型とするとその電動機は一般的には逆突極型となる。この逆突極型のPMSMは制御電流の観点から見ると、最大トルク点が最初から弱め界磁側に有る為、強め界磁運転による効果的なトルクの増大を利用する事が不可能であると共に、高速運転を目指す場合、一般的には更に弱め界磁を強める方向に制御する事になる事から、必然的に電流制御の幅が狭く、良好な制御を行う為には分解能の高い、その分コストアップに結びつく、より高級なエンコーダを必要とする(附図-3の説明参照)。

この問題に対処する為、PMSMを突極化する為の工夫にも幾つかの例が報告されているが、これ等も夫々問題を抱えている(附図-4、附図-5の説明参照)。

そこで、我々も別の方向での工夫によってこの問題に対処すると共に、より一層の高性能化を図る事を目的として本研究に着手したものである。

2. 設計したロータについて

既に報告されている、附図-5の構造のタイプのIPMSMは我々の身の回りでは製作されておらず、馴染みが薄く殆ど実際に適用される見込みが無いので、我々としては我が国内に於ける実用化を目指す意味で磁石の設置方向がロータの半径方向では無く、馴染みのある周方向に設置されたロータについて同図と同様の工夫を施す事を考えた。

図-1は国内で市販されている或るIPMSMの一極分(以下同様)の断面図である。

図-2は図-1のステータを流用して設計した提案するタイプの初設計機のロータの断面図であり、直軸インダクタンス L_d を形成するd軸磁束には大きな影響を与える事無く主として横軸インダクタンス L_q だけを低下させる事によって逆突極比を改善する事を目的としてq軸磁束を障害する為のバリヤーを設けたものである。

又、図-3は初設計機の性能が劣悪であったの

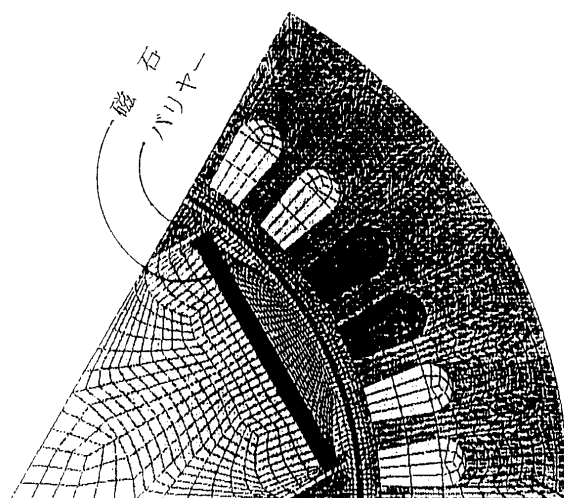


図-1 標準とした市販電動機の断面図

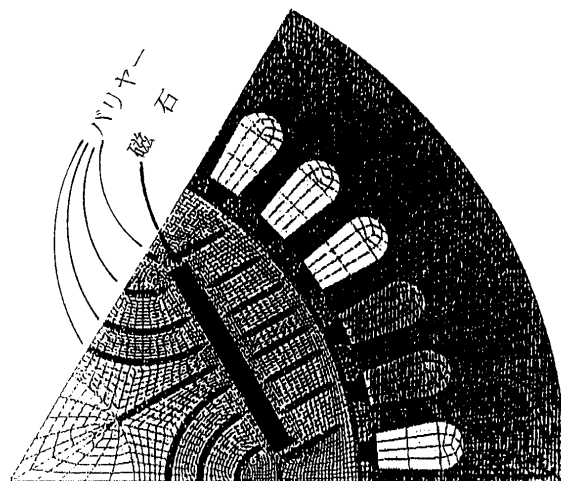


図-2 初設計の電動機の断面図

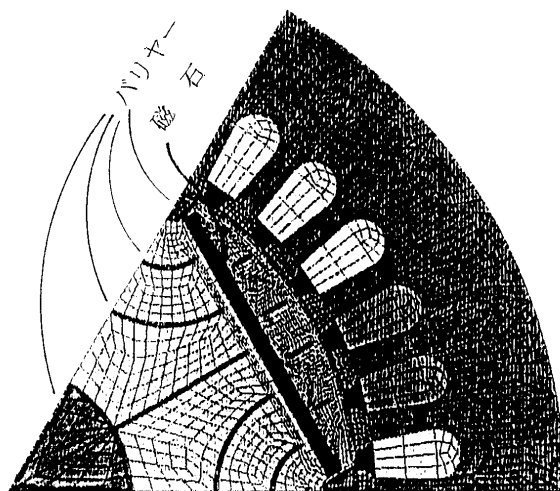


図-3 再設計した電動機の断面図

で設計し直したロータの断面図である。想定している効果をより確実なものとする為にシャフトも非磁性材料とした（この事を標準機にも適用してシミュレーションを行ったが、標準機の形態が殆ど全ての電気、磁気的なやり取りがロータの表面に近い部分で行われるタイプの電動機であった為と考えられるが、性能にはほぼ完全に無関係であった）。

3. シミュレーションの結果

図-4及び、図-5はこれ等三者の一相当りの無負荷起電力波形と無負荷線間電圧の波形を比較して示した図である。

図-6及び、図-7は同じくこれ等三者のトルク特性と出力特性を比較して示した図である。

図4～7の各図より、再設計機では標準機に比べて一相当りの無負荷誘起起電力で約6.5%向上した他、最大トルクはほぼ完全に同等ながら、最大出力は約2.5%の向上を見た。

最大トルクを発生する電流の誘起起電圧に対する位相差を示す角度が標準機では弱め界磁側約30度であったものが、再設計機では弱め界磁側約20度となっており若干の改善となっている。

目標とした突極比や性能の大幅な改善は現在の段階では果たせておらず、設計の再やり直しを予定している。

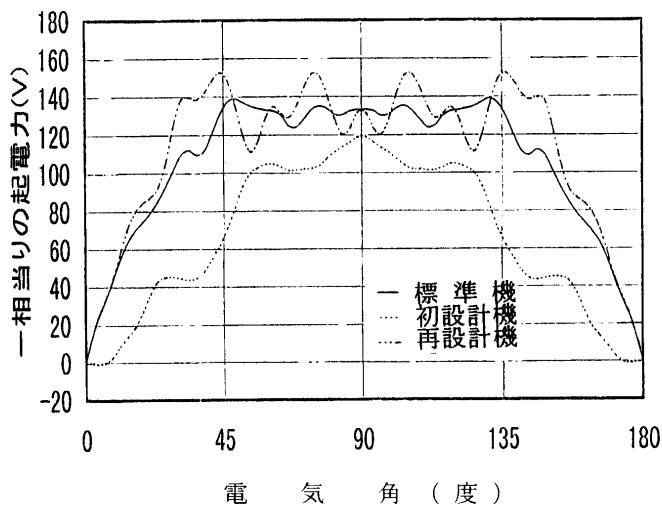


図-4 一相当りの無負荷起電圧

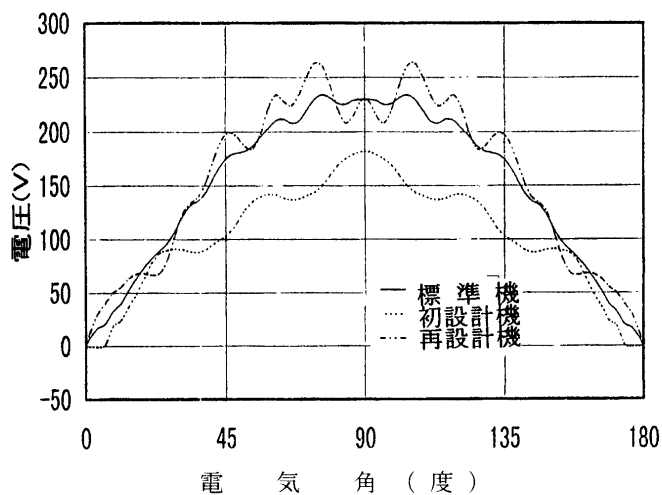


図-5 無負荷線間電圧

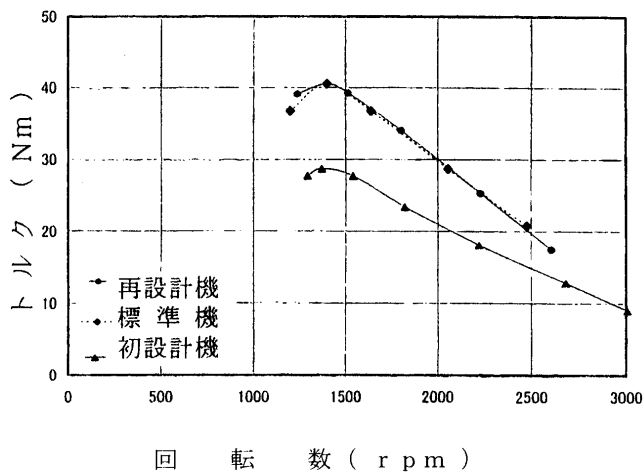


図-6 トルク-速度特性の比較

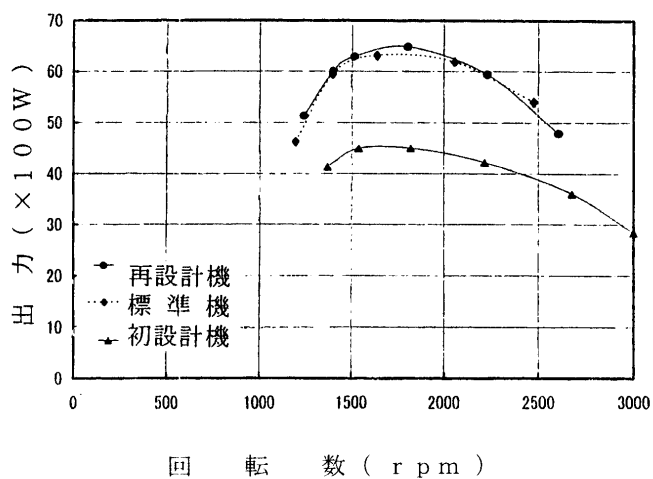
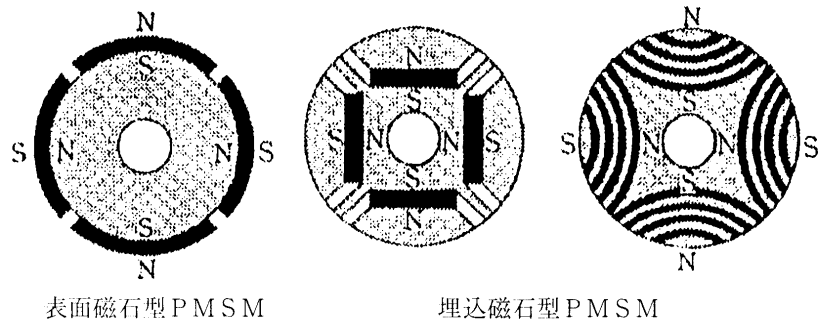


図-7 出力-速度特性の比較

4. まとめ

新しいタイプのロータ構造による逆突極性及び、性能を改善したIPMSMを得るべく本研究に着手したものであり、その第一報である。

現在の段階では逆突極性や性能の改善は大幅なものでは無いが夫々について改善された結果を得た。



附図-1 PMモータの回転子

附録. 本研究の背景を成す基礎的な事項

附図-1はPMSMを構成するロータの幾つかを例示する図である⁽¹⁾。

磁石のN極の方向が直軸(d軸)であり、その方向に横軸(q軸)磁束を生じさせるq軸電流 I_q が位置し、d軸から電気角で 90° ずれた位置がq軸であり、その方向に直軸(d軸)磁束を生じさせるd軸電流 I_d が位置している。

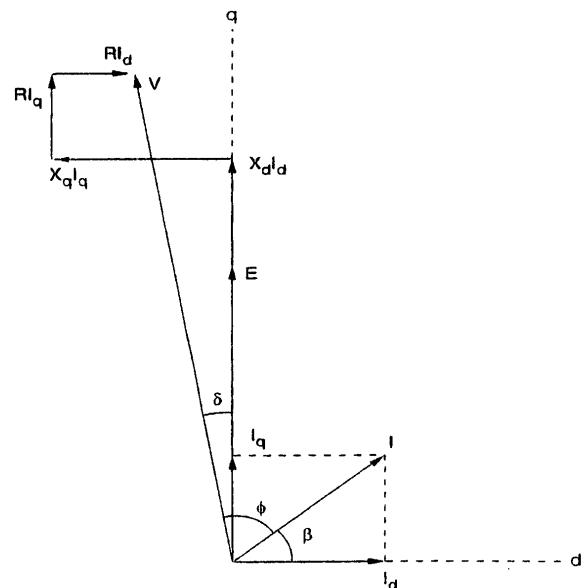
同図中「左」は表面磁石型の例であり、通常突極比は1となる。同図中「中」は通常の埋込磁石型の例であり、突極比は通常1よりやや小さい値となり逆突極性を示す。同図中「右」はリラクタンスモータ(反作用電動機)としてのトルクを有効に利用しようとするタイプの埋込磁石型の例であり、通常突極比は1よりかなり小さい値となり、強い逆突極性を示す。

附図-2は同期電動機の強め界磁運転状態でのベクトル図である。

同図では、 $X_d I_d$ 成分がE成分に相加わる方向に描かれているが、この状態が強め界磁状態である。

弱め界磁運転時には電流ベクトルが反時計方向に回転して、第2象限側に来る状態、即ち、d軸電流分を示す、電流のベクトル図上の横軸成分が左向き(符号としては-)となり、 $X_d I_d$ 成分がEを弱める方向に描かれた状態となる。

式(1)~(2')は内部抵抗分を無視したPM



附図-2 同期電動機のベクトル図

SMの電圧及び、トルクを示す式であり、(2)式から見て取れる通り、 $L_d > L_q$ では $I_d > 0$ の時、 $L_d < L_q$ では $I_d < 0$ の時、第2項によるトルクの増加が期待出来る。突極比を $\chi = L_d / L_q$ と定義する時、これ等の事を別の言葉で表現すると、「突極機では強め界磁領域で第2項によるトルクの増加が期待出来、逆突極機では弱め界磁領域で第2項によるトルクの増加が期待出来る」事になる。

$$V = \omega \sqrt{(\Psi + L_d I_d \cos \beta)^2 + (L_q I_q \sin \beta)^2} \quad (1)$$

$$\sqrt{(E + X_d I_d)^2 + (X_q I_q)^2} \quad (1')$$

$$T = \frac{m}{2} p (\Psi I_q + (L_d - L_q) I_d I_q) \quad (2)$$

$$= \frac{m}{2} p (\Psi I \sin \beta + (L_d - L_q) \times I^2 \cos \beta \sin \beta) \quad (2')$$

$$= \frac{m}{2} p (\Psi I \sin \beta + \frac{1}{2} (L_d - L_q) \times I^2 \sin 2\beta) \quad (2'')$$

但し、 V は端子電圧、 E は起電力、 ω は角速度、 I は電流、 I_d 、 I_q は夫々、 d 軸電流及び、 q 軸電流、 Ψ は鎖交磁束量、 L_d 、 L_q は夫々、 d 軸インダクタンス及び、 q 軸インダクタンス、 X_d 、 X_q は夫々、 d 軸リアクタンス及び、 q 軸リアクタンス、 β は電流と d 軸の成す角、 m は相数、 p は極対数である。

附図-3は突極機、非突極機及び、リラクタンストルク中心の強い逆突極性を持つ電動機のトルク特性を示すグラフであり、図中、(i)、(ii)及び、(iii)の各曲線は夫々、非突極機、強い逆突極性を持つ電動機及び、突極機のトルク特性を示すグラフである。

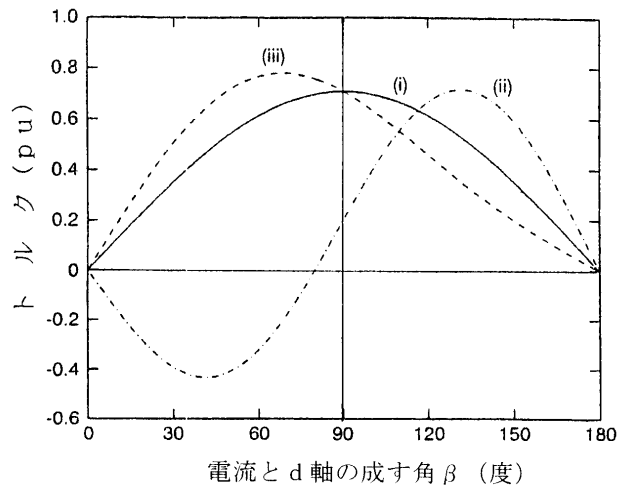
同図を見れば、突極機と強い逆突極性を持つ電動機夫々の角 β に対する制御の幅の広狭についての問題が良く分かる。

附図-4はPMSMを突極化する為の工夫の一つであり、ハイブリッド型又は、ツーパートロータ型と称し、リラクタンスモータのロータと通常非突極のロータとを組合わせた例を示した図であり⁽²⁾、附図-5は別の、より直接的な突極化に向けた工夫を施した例を示す図である⁽³⁾。

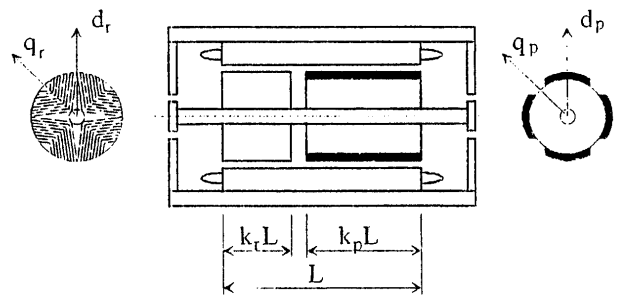
附図-4については到底大量生産を前提とした工夫とは思えず、又、遠心力対策の面から見ても高速性を前提としているとも考えられない。

又、実機として報告された附図-5の例では余り高い突極比は取れていない(報告では1.5である)。

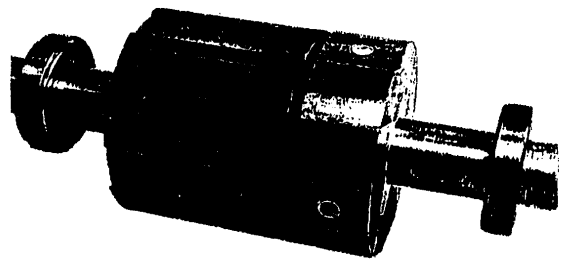
更に実機とされているものの、附図-5の構造ではシャフトを非磁性材料とすれば漏れ磁束が少



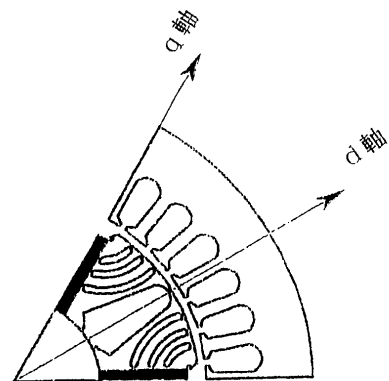
附図-3 突極比によるトルク特性の違い



Structure of motor with two-part rotor.



附図-4 ツーパートロータ



附図-5 突極型 IPMSM

なくて済むと言う利点は有るが、それでは各ロータ鉄心同士がバラバラに離れてしまい、シャフトとロータ鉄心とを結合する為の工夫が必要となる一方、より常識的にシャフトと磁石の間に鉄心を通すとしても、磁石の埋込構造の面で、磁石の脱落を防ぐ為の「楔」を必要とすると言うマイナス面が有り余り優れた構造とは言えないものである。

参考文献

- 1) 電気学会：「リラクタンストルク応用電動機と制御システム」, 電気学会技術報告, 第 719 号, (1992-2)
- 2) B.J.Chalmers,R.Akmese,L.Musaba, “Design and field-weakening performance of permanent-magnet /reluctance motor with two-part rotor”, *Proc. Inst. Elect. Eng.*, pt. B, vol. 145, no. 2 pp.133-139, 1998.
- 3) N.Bianchi,S.Bolognani,B.J.Chalmers, “Salient-rotor PM synchronous motor for an extended flux-weakening operation range”,*IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 36, no. 4, 2000.