

解説



Review

SPM モータと IPM モータの特長について

百目鬼英雄*

Review of Feature Performances of SPM and IPM Motors

Hideo Dohmeki

Synopsis

Application of PM motor has spread from the demand of energy saving by a global warming issue. A SPM motor and the IPM motor of PM motor are typical kinds. This description explains that feature about two motors.

The SPM motor explained the winding technology for realizing high efficiency, and the technology of reducing a torque ripple. An IPM motor explains work of reluctance torque and the expansion effect of the control range.

1. 緒 言

地球温暖化に代表される環境問題を契機として、省エネルギーが最大の関心事となっている。モータは電気エネルギーの 50 % 以上を消費しているため、その効率向上に対する要求が高まるとともに、少しでも高い効率特性を持つ種類のモータを選択するようになっていく。そのため、1990 年代後半から、各種モータに対する更なる効率向上を目指した研究開発が推進された。その結果最も高効率を実現できるモータとして、永久磁石を界磁とする PM モータが自動車、家庭電化製品、さらに従来では油圧を動力源としていた大型の産業用用途にまでその適用が広がっている。

PM モータという言葉は、ブラシ付 DC モータを包含している用語であるが、近年は効率向上に主眼を置いた使われ方がされるため、永久磁石同期モータ（以降 PMSM と略称）を指す用語として使われており、本稿でも PMSM に対して PM モータという言葉を使用する。

PM モータ発展の歴史は、永久磁石の研究開発とともに歩んでいることはいままでもない。アルニコ磁石を応用したハイブリッド形ステッピングモータ、フェライト磁石を応用した DC モータ、希土類系磁石の開発による

AC サーボモータなど、高エネルギー積の磁石が開発されるたびに磁石特性を生かす PM モータが開発されてきた。

特に、1980 年代後半に従来のサマリウム・コバルト磁石のエネルギー積の倍以上の能力を持つネオジム磁石の開発はモータ設計者に大きな刺激を与え、その磁石性能をより有効に発揮させるための開発が積極的に行われ、巻線技術やモータの製造技術も大きく進歩することとなった。

本稿では、PM モータの中で現在でも特性改善が進む SPM モータと IPM モータについて解説する。

2. PM モータの構造と分類

同期モータ（SM と以降略称）は、巻線を含む界磁磁界を持つものと持たないものに大別できる。前者のモータで界磁を永久磁石で構成したものが PMSM である。後者は、電機子の作る磁界により突極性を持つロータが引き合うトルク（リラクタンストルク）を利用するモータで、リラクタンスマータと呼ばれる。

リラクタンスマータは、界磁に永久磁石を使用しないため、誘導モータ同様堅牢で経済性を持ち、効率も誘導モータより数パーセント優れることから、各方面で実用化が試みられている。しかし振動・騒音などクリアすべ

き課題もあり、本格的実用化の段階まではいたっていない。

PMSM をロータ構造から分類すると Fig.1 に示すようになり、永久磁石をロータ表面に配置するか内部に配置するかで大きく分類できる。前者を表面磁石形 (SPM) モータと呼び、後者を埋め込み磁石形 (IPM) モータと呼んでいる。磁石の埋め込み方は色々な方式が考えられ、それぞれに特長を持つことを後述する。

ブラシレス DC モータは、DC モータのブラシと整流子を磁極センサと半導体スイッチで置き換えることでブラシをなくしたという意味を込めて付けられた名称であり、構造は回転界磁の PM モータと同様である。ただし、駆動の電流が正弦波ではなく、矩形波である点に違いがあるだけである。ブラシレス DC モータは、理想的にはトルクリプルを発生しないが、スロットの影響と励磁のスイッチングの影響などで大きなトルクリプルを発生することが問題となっている。そのため矩形波での駆動から台形波から正弦波の駆動方式が採用されるようになっており、今後 SPMSM の範疇に吸収される可能性を持った用語と考えられる。

PM モータは、開発当初は誘導モータの固定子と同様全節巻の巻線構造が採用され、同期モータの回転子の界磁巻線を永久磁石で置き換えただけの構造であった。一方、ブラシレス DC モータは、1つのスロットに集中して巻線を施す集中巻線構成のステータ構造であった。PM モータにもこの巻線構造が銅損を減らし高効率を実現できるため、集中巻線方式のステータが採用されている。

3. SPM モータの特長

表面磁石形 (SMPM) モータは、永久磁石をロータ表面に張り、ステータを集中巻とした構造のモータである。永久磁石材料の進歩と共に出力密度を挙げて性能改善が行われおり、主に小容量の分野で使用されている。

式 (1) に示すようにトルクは、永久磁石の発生する起磁力を正弦波状に分布させ、正弦波電流で制御することによりモータの回転角によらずトルクリプルを発生せず、回転数によらず電流とトルクは比例関係にある。

$$T = K_T \sin \theta I \sin \theta + K_T \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) I \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) + K_T \sin \left(\theta + \frac{4\pi}{3} \right) I \sin \left(\theta + \frac{4\pi}{3} \right) = \frac{3}{2} K_T I \quad \dots\dots(1)$$

その代表的な速度トルク特性を Fig.2 に示す。定格で基準化する単位法で示しているが、定格速度に対するトルクで特性を決定するように設計されている。定常運転を行う定格領域と、加速・減速時の制御性を向上させるための瞬時領域から成り立っている。DC モータ同様の制御性を有し、ブラシの接触による摩擦損がないことから回転速度に制限がなく、汎用の AC サーボモータとして使用されている。

一般に PM モータは、回転速度に比例する電圧（以降、逆機電圧と呼ぶ）を印加電圧と逆向きに発生する。最大トルクを発生する速度は、モータの印加電圧で制限される。したがって、印加電圧以上の逆起電圧を発生する速度では回転させることができず、速度制御範囲を大きく取る用途に対して使用を制限しており、この問題を改善する特性を持つものが IPM モータと考えることもできる。

当初、PM モータは、定格回転数を 2000 rpm から 3000 rpm とし、極数を 4 とするものがほとんどであった。誘導モータ同様、定格回転数を与える同期速度で極数が決

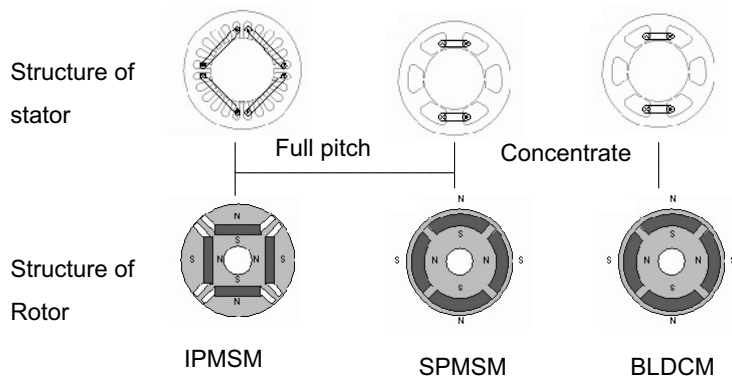


Fig.1. Classification of PM motor.

定されていた。しかし、インバータ駆動されるモータでは、定格回転数は周波数にはあまり依存しないという大きな特長を持っている。事実ハードディスクのスピンダルに使われるモータでは、極数を8とするなどの多極化が行われ、効率向上やトルクリプル低減などの目的に対応するステータスロット数とモータ極数の組合せ(以降スロットコンビネーションと略称)が検討されていた。

PM モータ開発の初期段階では、単純に高性能の磁石を使用すればギャップの磁束密度を高く、同一電流でのトルクを高くできるという前提で、高出力モータとなると考えていた。この考えが怪しくなったのはネオジウム磁石が実用化されるようになってからである。サマコバ系磁石と比較し倍以上のエネルギー積を持つ磁石の出現により、高性能磁石を使用してギャップ磁束密度を高くした場合、電磁鋼板を飽和させないような磁束密度に抑えるスロット幅が要求されてしまった。このため、高性能永久磁石を使用した場合磁束を飽和させないようなスロット面積を確保する必要がある、それに反比例する形で巻線スペースがなくなり逆に大幅な銅損の増大を招くだけで、高効率には寄与しない結果となった。このため、多極化による磁気回路の見直しが行われ、現在では8極が一般的になっている。

SPM モータの課題として、更なる高出力化というだけでなく、回転の質が求められるようになってきている。

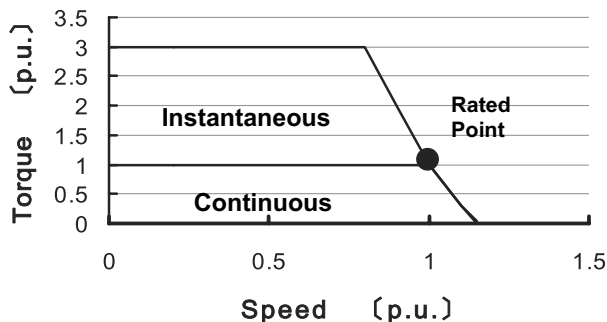


Fig.2. Speed vs torque characteristics.

3. 1 集中高密度巻線技術による高出力化

SPM モータのステータ巻線が集中巻で構成されることは説明したが、巻線方法も格段の進歩を遂げている。従来の巻線方法は、巻線機のノズルをスロットの中に入れ、ノズルを遥動することで巻線作業を行っていた。ノズルが動くためのスペースをステータスロット内に確保する必要がある、ノズルの動作範囲自身にも制約を与えていた。そのため、巻線を高密度で巻くことができず、巻線のスロット断面に占める占積率に限界があった。

占積率向上のため、巻線機のノズルの動作に制約を与えず巻線を整列して行うためには、ソレノイドコイルのように整列して巻線をする必要がある。そのためには、あらかじめボビンに巻線したコイルをステータに入れる必要がある。ここで考案された製造技術がステータを分割する方法がいろいろ開発された²⁾。

代表的方法は Fig.3 に示すように、ステータをそれぞれのスロットが自由に動くように連結された状態でまず直線状に打ち抜き、そのまま巻線を施し、その後丸めることによりステータを構成する方法である。従来の巻線方法では占積率が40から50%であったものに対し、その約2倍の80%にまで向上させることが可能となっている。

これら技術では多かれ少なかれ、コアにつなぎ目ができるため、主磁束の低下をまねくが、設計技術の向上によりせいぜい数%以下に抑えることが可能である。トルクは、次式の関係があることから、

$$T \propto K / \sqrt{R} \dots\dots\dots (2)$$

主磁束が5%減少し、占積率が80%になったと仮定すると、高密度巻線方式を適用することで許容銅損を同一とするならば

$$\text{トルク比} = 0.95 \times \sqrt{0.8/0.5} \cong 1.2 \dots\dots\dots (3)$$

定格トルクを同一とするならば

$$\text{銅損比} = \frac{1}{0.95^2} \times \frac{0.5}{0.8} \cong 0.69 \dots\dots\dots (4)$$

となり、モータ体格を同一とした場合、「定格トルクを約2割大きくできる」ないし「銅損を3割以上小さくできる」ということができる。この技術開発で、750 W のモータの体格が、容積で約1/3から1/4に、質量で約1/2から1/3になったとされる。

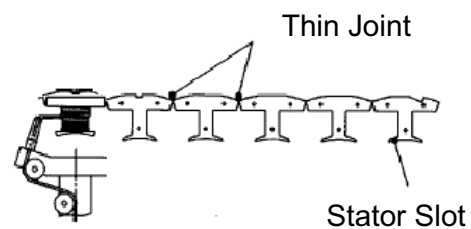


Fig.3. High density winding.

3. 2 低トルクリプル化

回転の質を要求される場合や、コギングトルクが振動・騒音に寄与している場合には、その低減が重要な課題となり、さまざまな方法が試みられ、実用的に使われている。従来 PM モータの設計は、トルクや効率といった定常特

性の向上に主眼がおかれていた。サーボドライブでは低トルクリプルで滑らかな回転が要求されている。さらに、自動車用パワーステアリング（以降 EPS と略称）に使用する PM モータには、人間の五感で感じないほどの低トルクリプルが要求されている。EPS 用モータのようにコギングトルクや鉄損がトルクに与える影響（ロストトルクと呼ばれているようであるが）など、過渡的なトルクリプルに対する対処も要求されるようになっている。

スロットコンビネーションによる特性の議論は、モータの開発黎明期以来なされてきたことではある。しかし、自由に組合せを考え、それを実現できるようになったのは、高エネルギー積磁石を利用し多極着磁が容易になり、集中巻線ステータ構造のモータでも十分な特性が発揮できるようになってからである。この組み合わせは、2 極 3 スロットを基本とするその整数倍での組合せと、8 極 9 スロットなど整数倍によらない組合せがある。

コギングトルクは、極数とスロット数の最小公倍数の次数で現れるため、高次の次数の組合せが良いとされる。現実にはモータの組付け状態による偏芯によってコギングトルクの次数は大きく変化する。そこで、理論的にスロットコンビネーションのコギングトルクに与える影響を考察するため、ほぼ同一の磁気回路設計をおこなった場合の分布を有限要素法により算出した。その結果が Fig.4 である。4 極 6 スロットから 14 極 12 スロットまでを比較した結果、9 スロットで極数を 8 ないし 10 とする組合せが一番コギングトルクを小さくできることが分かった。ただし、9 スロットの巻線は、磁気的には不平衡吸引力を発生することが課題となっている。

磁束分布とスロットの関係から発生するトルクであるので、永久磁石の起磁力分布によっても大きく影響される。代表的には磁石形状を、ロータ直径の中心から外周方向にオフセットすることで、弧の形状を丸くすること

で、起磁力分布を改善しようとするものである。この値を適切にすることで、コギングトルクを低減させることが可能であり、さらに誘起起電圧も基本正弦波となることから、現在 AC サーボモータを中心に使われている。コギングトルクの低減効果を考察するため以下のシミュレーションを行った。

磁石外径を変化させた時のコギングトルクの変化の様子を算定したものが、Fig.5 である。この結果から、R 寸法を変えることによってコギングトルクの値が顕著に変化していることが分かる。興味深いのは R5.5 と R8 とではコギングトルクの波形が反転していることである。すなわち、R8 の磁氣的安定点を 0 度とすると、R5.5 は 5 度の位置が磁氣的安定点であることを示している。R5.5 ではコギングトルクが非常に小さくなり、トルク波形の周期が通常の 10 度に対して、半分の 5 度になっており、周期が倍になる位相の反転課程が存在し最小値を取る R が存在する。このように、R 寸法を変えるとピーク値や位相が大きく変化し、適切な値にするとコギングトルクのピーク値が非常に小さくできる。ただし、コギングトルクはモータの製造上の偏芯や磁気異方性によっても大きく影響を受けるため、いろいろな要素を勘案して低トルクリプル化が行われている。

以上 SPM モータは高トルクの実現と低トルクリプル化を中心に開発が進められている。

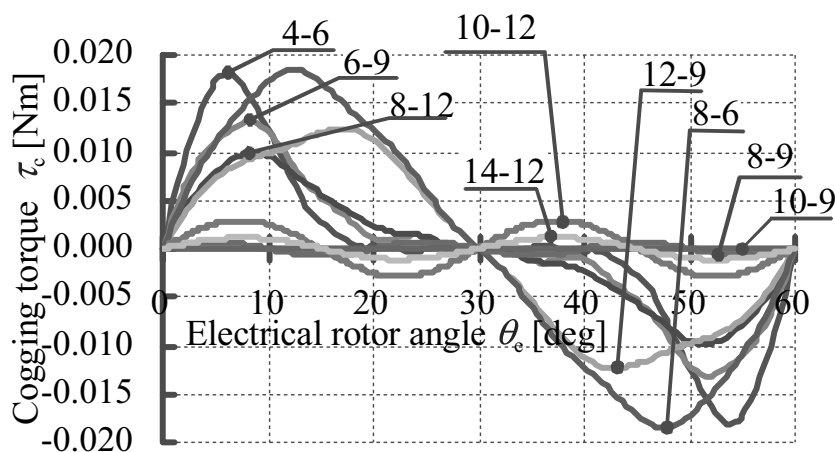


Fig.4. Cogging torque by slot combinations.

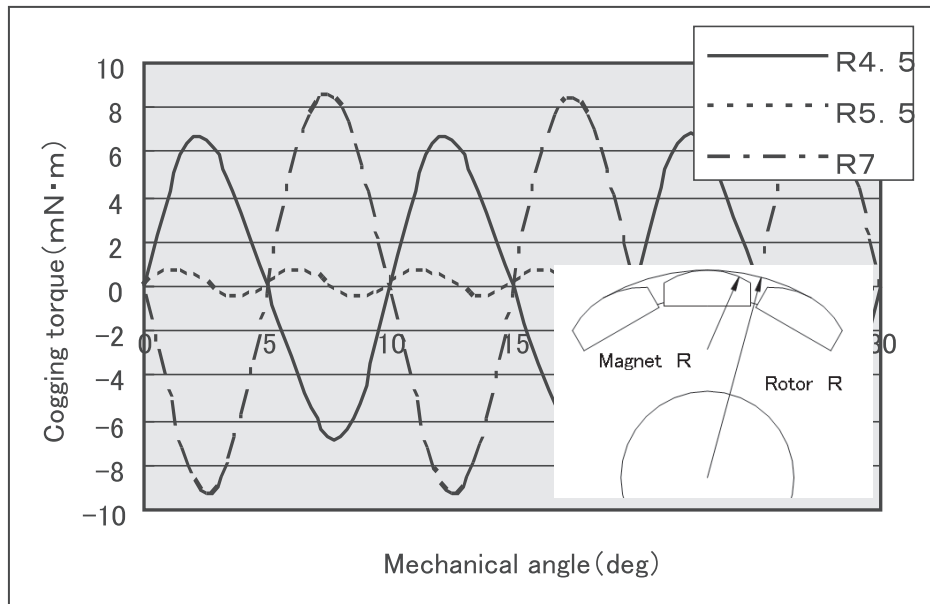


Fig.5. Reduction of cogging torque.

4. IPM モータの特長と技術

エアコンなど広範囲な運転を要求する用途に対して、PM モータは界磁が回転することによって発生する逆起電圧が最高回転速度を制限する。これに対し、磁石を回転子内部に埋め込むタイプの IPM モータの開発が進み瞬く間に応用範囲を広げている。

IPM モータは、始動用のかご型巻線を持った自起動同期電動機として古くから知られていたが、紡績機など特殊な用途にしか使用されなかった。インバータが実用になり、ベクトル制御を併用することによりリラクタンストルクが利用できるようになって始めて効果的な応用が始まったモータである。その歴史は、ここ 10 数年であり、この間さまざまな特性改善が行われてきた。

IPM モータの特徴を SPM モータと比較すると以下のようになる。

- (1) 弱め界磁が有効に利用できるため、速度制御範囲を広範囲に取ることができる。
- (2) SPMSM は磁石がギャップと対面しているため高速駆動では、磁石の飛散防止を行う必要があるが、IPM はロータ内部に磁石が埋め込まれるため、機械強度さえ考慮されていれば、高速回転に向く構造となっている。
- (3) 磁石の形状や配置の自由度が大きく、特性上の特徴を設計から創り出すことができる。
- (4) リラクタンストルクを併用できるため、高トルク化が実現できる。

IPMSM は逆突極性を持ち dq 軸インダクタンスに差が

あるモデルとして、dq 座標に変換した電圧方程式は次式となる。ここで、d 軸は永久磁石の磁束の方向に、これと電気角 $\pi/2$ 進んだ方向に q 軸が取られている³⁾。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \phi_a \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 i_d, i_q 電機子電流の d,q 軸成分

v_d, v_q 電機子電圧の軸成分

$\phi_a = \sqrt{2/3} \phi_f, \phi_f$: 永久磁石の電機子鎖交磁束の最大値

R : 電機子抵抗, L_d, L_q : d, q 軸インダクタンス

$R : p = d/dt, P_n$: 極対数

トルクは電流ベクトルと電機子鎖交磁束ベクトルの外積として求められ、次式となる。

$$T = p_n \phi_a i_q + p_n (L_d - L_q) i_d i_q \quad \dots\dots\dots (6)$$

または、電流ベクトルの大きさ $I_a = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$ と、q 軸との位相差 β を用いて次式で表せる。q 軸を基準とした電流位相 β は IPM の駆動において非常に重要であり、この角度は、無負荷時の誘起起電圧を基準にした電流位相に相当する。

$$T = p_n \left\{ \phi_a I_a \cos \beta + \frac{1}{2} (L_d - L_q) I_a^2 \sin 2\beta \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

トルク式の右辺第 1 項は、永久磁石の磁束と電機子電流によって発生する Bil 則に基づくトルク成分であり、PM モータ本来の発生トルクである。AC サーボモータや、ブラシレス DC モータのように、表面磁石タイプのものは、d 軸 q 軸のインダクタンス差がゼロとなる非突極機であり、第 1 項のトルクだけを使っている。

IPMSM は、Fig.6 の各軸に対する磁束の流れで示すように、d 軸磁路には永久磁石が存在するため磁束をとおしにくく、逆に q 軸は磁束をとおしやすくなっており、一般突極同期機とは逆の突極性をもつことを最大の特長としている。すなわち、 $L_d < L_q$ の磁気特性を有することから、d 軸電流によって発生する磁束 $L_d I_d$ が q 軸電流 I_q と鎖交することによるトルクと、q 軸電流によって発生する磁束 $L_q I_q$ と d 軸電流 I_d と鎖交することによるトルクに差があることから、第2項の磁氣的突極性に基づくリラクタンストルクが発生する。すなわち、SPMSM の制御では $I_d=0$ が制御則となっていたが、IPM では d 軸電流 I_d を流す、すなわち電流位相を q 軸より進ませることにより、リラクタンストルクを利用できるようになる。この時、d 軸成分電流は、永久磁石内部を通る方向に、その磁束とは逆方向の磁束を発生するため、電機子鎖交磁束を減少させる方向に働く。

リラクタンストルクは、 $0 < \beta < \pi/2$ の電流位相で正となり、 $\beta = \pi/4$ で最大となることから、トータルトルクは $0 < \beta < \pi/4$ で最大となり、Bil トルク単独よりも大きなトルクを発生できる。リラクタンストルクは電流の二乗に比例するため、磁気飽和を考えなければ、電流の増加に伴ってリラクタンストルクの貢献度は高くなる。また、電流位相の増加に伴って d 軸電流による現時作用が大きくなり端子電圧を減少させる。Fig.7 に、電流位相 β に対する諸量の特性の一例を示す。 β を可変することで、弱め界磁により Bil トルクが減少するものの、リラクタンストルクがそれ以上に発生し、結果としてトルク最大になるポイントが存在することが分かる。

ただし、永久磁石を減磁する方向に電流を流すため、保持力の強い磁気特性を持った磁石を要求し、近年の希土類磁石の進歩によりこのようなモータの出現を可能にしたと見ることもできる。さらに、q 軸電流による磁束は、

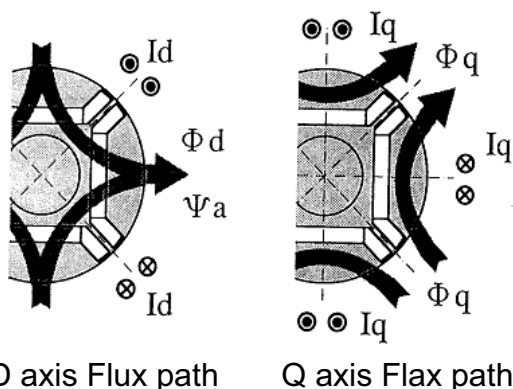


Fig.6. Difference of flux path by D and Q axis.

ロータ表面の鉄心部分を通るため、その電流の増大とともに磁気飽和を起こしやすくなり、磁気回路の面積をどう設計するかがポイントとなる。リラクタンストルクは、d 軸 q 軸のインダクタンスの差によって発生するため、この比 $\rho < L_q/L_d$ を突極比と呼び、IPM の能力を示す重要な指標となる。

同一電流で発生トルクを大きくするためには、鎖交磁束 ϕ を大きくするか、突極比を大きくするかである。たとえば、磁石を埋め込む深さを深くすれば、q 軸磁路が広がる分突極比は大きくできるが、磁石の利用面積が狭くなることから、鎖交磁束は小さくなってしまい、埋め込む深さを浅くした場合には、これと逆の関係になり、両者は設計上トレードオフの関係にあることが理解できる。

また、インバータの端子電圧もこれら定数によって決まるため、インバータ容量が制限される通常の用途では、単純に定数を大きく設計しても、定トルク運転範囲が狭くなるだけということになりかねない。一般に突極の大きいものは定出力範囲が広くなり、鎖交磁束数の大きいものは最大トルクが大きくなるという関係にある。IPM モータの代表的トルク回転数特性は、Fig.8 に示ようになる。基底速度を 1 p.u. としたとき、弱め界磁制御によりどれだけの速度領域を広められるかが設計のポイント

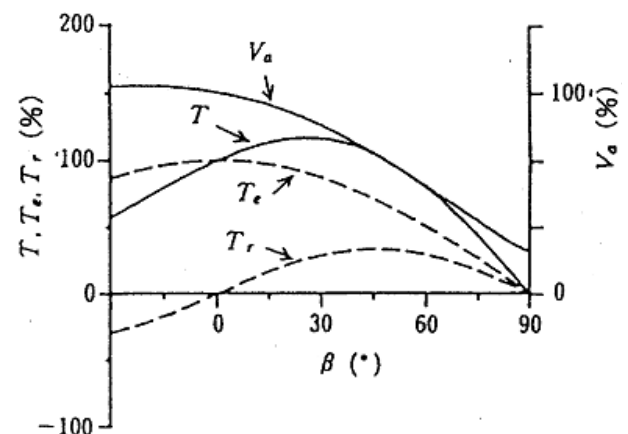


Fig.7. Torque characteristics by phase β .

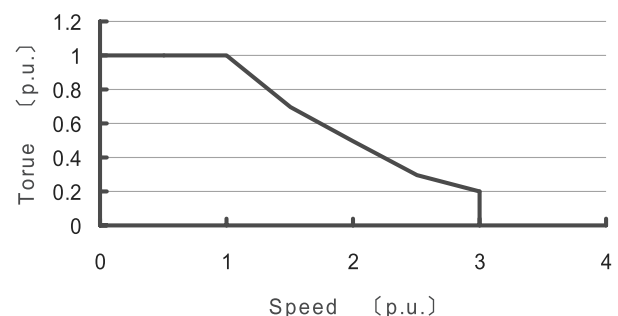


Fig.8. Speed vs torque characteristics of IPMSM.

であり、この例では3倍の速度範囲を持つことを示している。

このように、IPM モータは、アプリケーションによってその要求仕様に見合う設計をする必要のあるモータであるということができ、SPM モータのような一義的な設計というよりは、適材適所にあった構成が可能である駆動システムということができる。つまり、IPM モータの出現により、前章で述べた定格点でモータを設計するという考え方から、複数のポイントで仕様を満足するように設計思想が変化している。

基底速度以下の運転を前提とした高トルクのサーボ的要求に対しては、SPM モータが最高の性能を持つものと筆者は考えているが、速度範囲を広く取るといったいわゆるスピンドル用途の応用では IPM モータがその能力を発揮するものと考えている。最大トルク運転ばかりではなく、最大効率制御など、位相という自由度を生かした制御法が可能であり、モータ制御の面からも数多くの特徴を持っている。

最後に、モータの運転効率についての特性を Fig.9 に示す。定格点での効率は、SPM と IPM モータでほとんど変わらないが、低速度領域で IPM モータの効率が優れている。最近のモータには効率を面で考えるようになっており、このことから IPM モータは総合効率において優れていると考えられ、効率を重視したモータ設計では複数ポイントでの設計から進み、面での効率を考えた設計へと変化している点に注目される。

5. 結 論

SPM と IPM モータの特長について、それぞれの用途に応じた性能を取り上げ解説した。SPM モータは、比較的小容量の分野でサーボ性能を追求する使われ方が今後も行われると考えられ、IPMSM は、広範囲な高効率運転を実現しさらに大容量の分野にまで用途を広げていくものと推察される。

(文 献)

- 1) 百目鬼英雄：高効率モータ技術，日刊工業新聞社，(2001)，131.
- 2) 小形モータの高性能化に関する調査専門委員会：電気学会技術報告 第744号，(1999)，21.
- 3) 武田洋次，松井信行，森本茂雄，本田幸雄：埋め込み磁石同期モータの設計と制御，オーム社，(2000)，15.

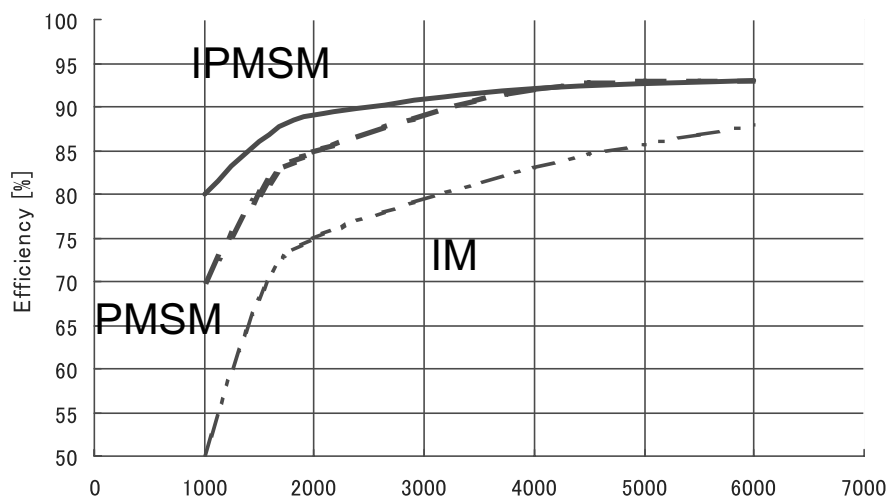


Fig.9. Motor efficiency.