

高速ACサーボモータの開発

小市 伸太郎
Shintarou Koichi

川岸 功二郎
Koujirou Kawagishi

小野寺 悟
Satoru Onodera

1. まえがき

工作機械の主軸駆動には、高速化と高加速度化が要求され、主軸用モータは、高速回転と高トルクを両立する必要がある。近年益々、モータの高速・高トルク化(運転領域の拡大)への要求が高まっている。

本稿では、このような要求に応えるために開発した内部磁石形同期サーボモータ(IPMモータ)の特長を紹介する。

まず、本開発IPMモータの主要諸元を示す。次いで、従来の表面磁石形同期モータ(SPMモータ)とトルク特性を比較検討し、本開発IPMモータでは、従来のSPMモータと同一のモータ体格とサーボアンプ容量のもとに高速化と高トルク化を実現できることを示す。

さらに、定常運転状態における効率をSPMモータと比較検討し、本開発IPMモータはSPMモータよりも高効率であり、装置の省エネルギー化にも大きく貢献できることを示す。

なお、本開発IPMモータの最大回転速度は 16000min^{-1} であり、定格出力は6kWである。

2. 本開発IPMモータの主要諸元

表1に工作機械の主軸用に開発した内部磁石形同期サーボモータ(IPMモータ)の主要諸元を示す。図1には、本開発モータの外観を示す。

本開発IPMモータは、全閉・外扇形の主軸用同期サーボモータであり、モータのフランジ寸法は155mm角、モータ全長は357mmである。

このサーボモータは、後述するように従来の表面磁石形同期サーボモータ(SPMモータ)と同一体格、同一最大電流のもとに、出力(トルクと回転速度)を増加したものである。従来、定格出力:4kW、定格回転速度: 3000min^{-1} 、最大回転速度: 12000min^{-1} のSPMモータに対して、定格出力:6kW、定格回転速度: 6000min^{-1} 、最大回転速度: 16000min^{-1} を実現した。

3. トルク特性

3.1 PMモータの発生トルク

永久磁石形同期モータ(PMモータ)の発生トルク T は次式で表される。

$$T = 3p\{(E_m/\omega)I_q + (L_d - L_q)I_d I_q\} \quad (1)$$

$$I_q = I_a \sin \phi \quad (2)$$

$$I_d = I_a \cos \phi \quad (3)$$

ただし、 p :極対数、 E_m :永久磁石による誘起起電力、 ω :電源角周波数、 L_d 、 L_q : d 軸および q 軸電機子インダクタンス、 ϕ :起磁力相差角(d 軸と電機子起磁力中心との相差角)、 I_d 、 I_q : d 軸および q 軸電機子電流、 I_a :電機子電流である。

(1)式右辺第1項がマグネットトルク成分であり、第2項がリラクタンストルク成分である。表面磁石形同期モータ(SPMモータ)の場合には、 $L_d=L_q$ であるので、リラクタンストルク成分は生じない。したがって、SPMモータで高トルク化を図ろうとすると、誘起起電力(E_m)を大きく設計する必要があるが、誘起起電力を大きくすると、高速域で電圧飽和を起し、トルクが低下する。勿論、SPMモータにおいても $\phi > \pi/2$ に設定して、等価弱め界磁制御を行うことにより電圧飽和を緩和することができるが、トルクが低下すると共にマグネット表面に高調波渦電流損が生じるので効率が悪くなる⁽¹⁾。

一方、内部磁石形同期モータ(IPMモータ)では、 $L_d < L_q$ となるので、 $\phi > \pi/2$ の範囲で電流制御することにより、 d 軸電機子電流による等価弱め界磁を行い、電圧を抑制しながら、マグネットトルク成分に加えてリラクタンストルク成分を有効トルクとして活用できる。したがって、高速域でのトルク低下を招くことなく運転領域の拡大を図ることができる。

3.2 トルク - 回転速度(T - N)特性の比較

図2に当社製の従来SPMモータと本開発IPMモータのトルク - 回転速度特性(瞬時領域)の比較を示す。このSPMモータとIPMモータは、ステータ鉄心の積厚および内径が同一であり、外径もほぼ同じである。また、駆動用サーボアンプも同一である。ただし、IPMモータ駆動用のサーボアンプは、リラクタンストルク成分を制御できる機能を有している。

図2から明らかなように、本開発IPMモータは従来SPMモータに対して、低速域の最大トルクが約13%向上し、最大回転速度は約1.3倍増加している。このように、本開発IPMモータは、従来と同一のサーボアンプ(同一電流)、同一のモータ体格のもとに、高トルク化と高速化を実現していることがわかる。

本開発IPMモータは、高トルク化と高速化を両立するように、マグネットによる誘起起電力とリラクタンストルクを最適に設計している。たとえば、SPMモータに比べてマグネット磁束による誘起起電力が小さくなるように設計して、高速域における速度起電力を低く抑え、同時に、リラクタンストルク成分を大きくするために、回転子鉄心形状を最適化している。

ここで、図2に示したIPMモータの特性をSPMモータで実現しようとした場合を考えてみる。

最大回転速度: 12000min^{-1} を 16000min^{-1} に高速化しようとするれば、高速回転時の電圧飽和を避けるようトルク定数(誘起起電力定数)を下げて設定することになる。したがって、同じトルクを得るためには電流を増やす必要が生じるので、サーボアンプの電流容量の増加(約1.5倍)を招く結果となり、大幅なコストアップとなる。

また、低速域の最大トルクを10%増やすためには、モータ鉄心の積厚を増加する必要がある。しかし、積厚が増えると高速時の損失(鉄損)が増加するため、高速域で温度上昇が過大となる。

このように、SPMモータでは、経済的な設計のもとに、高トルクと高速化を両立させることが難しい。上述のように、本開発IPMモータでは、同一のサーボアンプ電流容量と同一のモータ体格のもとに、高トルク・高速化、すなわち、運転可能領域の拡大を実現した。

なお、本開発IPMモータは、対遠心力強度を高くするように、回転子鉄心形状とマグネットの配置を考慮している。

4. 定常運転時の効率と温度上昇

4.1 定常運転時のモータ効率

前述のように、IPMモータでは、マグネットトルク成分に加え、リラクタンストルク成分を利用できるので、単位電流あたりの発生トルクが大きくなり、SPMモータと比較して、同じ発生トルクにおける電機子銅損が低減する。また、SPMモータと比べて、回転子表面に生じる高調波渦電流損が減少するので、SPMモータより運転効率が向上する。

表2に従来SPMモータとIPMモータの定格出力時の効率比較を示す。モータ効率は、SPMモータ:86%に対して、IPMモータでは90%に向上している。SPMモータに対してIPMモータでは、電機子銅損が約13%低減、(鉄損+機械損)が約45%低減している。本IPMモータでは、マグネットによる磁束密度を低く設計しているため、電機子鉄心に生じる基本波鉄損が低減している。また、マグネットが空隙部に露出していないために、マグネットに生じる高調波渦電流損も低減している。このように、本開発IPMモータは高効率であり、このモータを用いた機械装置の省エネルギー化にも十分に寄与するものと考えられる。

4.2 モータの温度上昇

表3に、定常運転時の温度上昇比較を示す。表中の温度上昇値はSPMモータに対する相対値で示している。このSPMモータは定格回転速度:3000min⁻¹、定格出力:4kWであり、この定格時のSPMモータのフレーム表面温度を1として、温度上昇の相対値を示している。

表3からわかるように、本開発IPMモータの温度上昇値は従来SPMモータに対して、4kW/3000min⁻¹時:75%、6kW/6000min⁻¹時:61%、6kW/10000min⁻¹時:77%であり、効率の向上に伴って、温度上昇値が大幅に低減している。モータ表面の温度上昇値は、45K以下である。

このように、本開発IPMモータは、従来SPMモータと同じ体格で低温度上昇のもとに、1.5倍の連続出力が可能となる。また、温度上昇が低減しているために、モータの構成部品の長寿命化が図られる。

5. むすび

本稿では、工作機械の主軸用モータに対する高速・高トルク化(運転領域の拡大)要求に応えるために開発した内部磁石形同期サーボモータ(IPMモータ)の特長を紹介した。

今回開発した高速IPMモータは、同一体格の従来SPMモータと比較して、

- ①低速域(0~4000min⁻¹)の瞬時最大トルクが13%向上する。
- ②高速域(5000min~16000 min⁻¹)の瞬時最大出力は1.2~1.5倍に向上する。
- ③定常運転時の効率は4%向上(損失は30%低減)する。
- ④連続出力は1.5倍に向上する。

本開発IPMモータは、サーボアンプ容量とモータサイズを大きくせずに、広い速度制御領域を高効率で運転できることを実現した。このサーボモータは、機械装置の小型化、高速化、および省エネルギー化に大きく貢献できるものと考えられる。

文献

(1)高橋・松下・小野寺:「永久磁石同期電動機の鉄損に関する検討」、平成9年電気学会

小市 伸太郎
1985年入社
サーボシステム事業部 設計第1部
サーボモータの設計、開発に従事。

川岸 功二郎
1996年入社
サーボシステム事業部 設計第1部
サーボモータの設計、開発に従事。

小野寺 悟
1986年入社
サーボシステム事業部 設計第1部
サーボモータの設計、開発に従事。工学博士。

定格出力	6kW	検出器	光学式インクリメンタルエンコーダ
定格トルク	9.8N・m	保護形式	IP44 (軸貫通部と外扇部を除く)
定格回転速度	6000min ⁻¹	冷却方式	全閉、外扇
瞬時最大トルク	44N・m	振動階級	V3
最大回転速度	16000min ⁻¹	フランジ角寸法	155mm
ロータイナーシャ	19.6×10 ⁻⁴ kgm ²	モータ全長	357mm

表1 本開発IPMモータの主要諸元

モータ形式	極数	フランジ角 (mm)	モータ全長 (mm)	回転速度 (min ⁻¹)	トルク (N・m)	出力 (kW)	効率 (%)
従来品SPMモータ	4	155	364	3000	12.7	4	86
開発品IPMモータ	4	155	357	3000	12.7	4	90

表2 連続定格運転時の効率比較(実測値)

出力 (kW)	回転速度 (min ⁻¹)	トルク (N・m)	モータ表面温度上昇	
			IPMモータ	SPMモータ
4.0	3000	12.7	0.75	1
6.0	6000	9.8	0.61	1.08
6.0	10000	5.7	0.77	1.17
0.0	16000	0	0.87	—

表3 温度上昇値の比較(実測値)

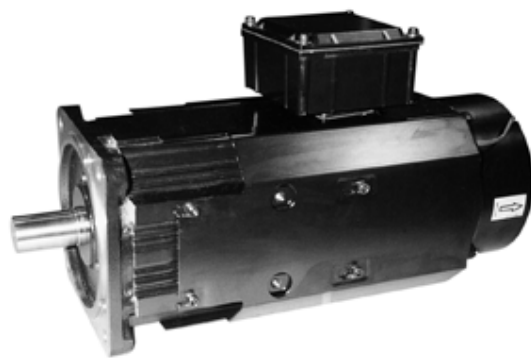


図1 主軸用IPMサーボモータの外観

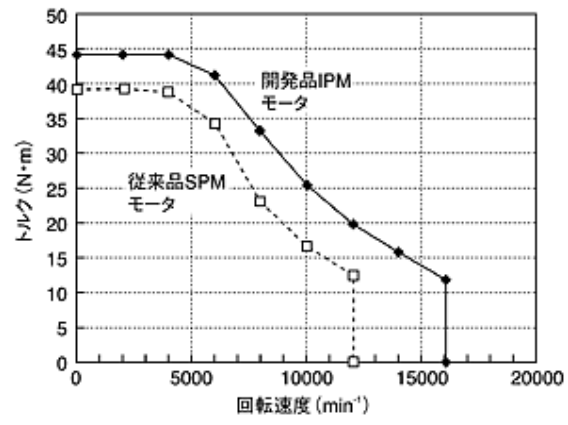


図2 トルク—回転速度特性(瞬時領域:実測値)
 (入力電圧:3φ-200、モータ最大電流:155A_{rms})