

永久磁石同期電動機のセンサレス制御技術

野村 尚史 (のむら なおふみ)

大沢 博 (おおさわ ひろし)

① まえがき

永久磁石同期電動機 (PMSM) は誘導電動機と比べて効率がよく小型であり、エアコン、ファン、ポンプ、エレベータなどに多く使われている。

PMSM を運転するためには、回転子の磁極位置に応じて電流と電圧を制御する必要があり、従来は、エンコーダやホールセンサなどの位置検出器を使って運転していた。しかし、位置検出器を使うことで、価格アップ、検出器の取付けや配線作業の煩雑さ、信頼性低下、大型化などの問題が発生することがある。また、最近では、装置を小型にするために高速 PMSM の適用が進んでおり、機械的な制約から位置検出器が使えないケースが増えている。このため、位置検出器を使わないで運転するセンサレス制御は、PMSM ドライブにとって不可欠な技術である。

富士電機では、多様なニーズに対応するため、2種類のセンサレス制御技術を開発した。一つは、大きな始動トルクが得られ、高精度なトルク制御ができる「センサレスベクトル制御」である。もう一つは、安価なハードウェアでセンサレス制御ができる「V/f制御」であり、PMSM ドライブ製品「FESPAC シリーズ」などに応用されている⁽¹⁾⁽²⁾。

本稿では、センサレスベクトル制御と V/f 制御の原理について述べ、実験結果をもとにおのおのの特徴と性能を比較する。

② センサレスベクトル制御

図 1 にセンサレスベクトル制御のブロック図を示す。位置検出器を使う代わりに、電流と電圧から回転子速度と磁極位置を演算し、これらを使って磁極と平行方向と直交方向の電流成分を制御することでトルクと速度を制御する。

センサレスベクトル制御は、最近主流になっている埋込磁石構造永久磁石同期電動機 (IPMSM) に適した制御方式である。IPMSM は、従来の PMSM と比べて低価格、小型、堅牢 (けんろう) であり、回転子に「突極性」を持つ特徴がある。この突極性を積極的に活用することで、従

来困難であったゼロ速度時のセンサレス制御ができる。

以下、各制御の特徴について説明する。

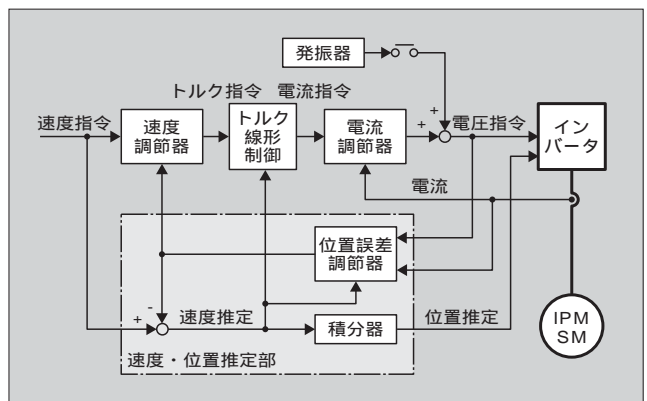
2.1 速度・位置推定部

速度・位置推定部は、IPMSM の電圧方程式をもとに電流と電圧から磁極位置誤差を検出し、誤差がゼロになるようにフィードバックループを構成して速度と位置を演算する。広い速度範囲で安定運転を実現するため、速度に応じて二つの位置誤差検出方式を使い分ける。

中・高速時は、IPMSM の電圧方程式を使って演算した電流推定値と電流検出との偏差から位置演算誤差を検出する。電流偏差に表れる位置演算誤差の情報は、誘起電圧 (回転子の永久磁石により固定子巻線に誘導される電圧) に比例して大きくなるので、速度が高いほど演算精度を高めることができる。しかし、誘起電圧が小さい低速時には、電流偏差から位置演算誤差を検出できないため、別の方式を使う。

IPMSM は回転子の突極性により、電機子巻線のインダクタンスが磁極位置によって変化するので、この特徴を使えば速度にかかわらず位置情報を検出できる。そこで、低速時には、電圧指令に高周波電圧を重畳して、このときに流れる高周波電流からインダクタンスを測定し、これをもとに位置演算誤差を検出する⁽³⁾。

図 1 センサレスベクトル制御のブロック図



野村 尚史

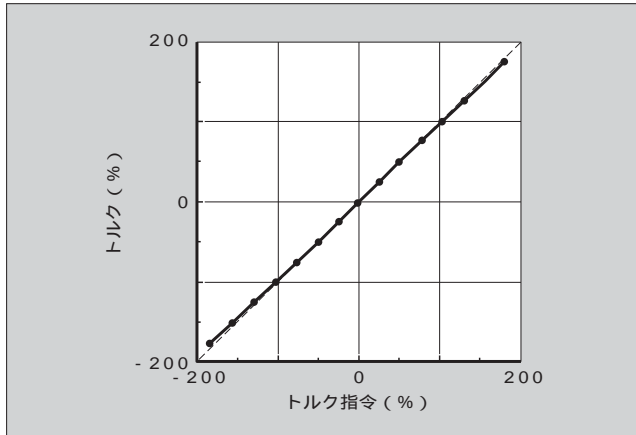
可変速駆動装置の開発・設計に従事。現在、(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス研究所。電気学会会員。



大沢 博

可変速駆動装置の開発・設計に従事。現在、(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス研究所。主席研究員。電気学会会員。

図2 センサレスベクトル制御のトルク制御精度



2.2 IPMSM の高効率トルク線形制御

IPMSM は回転子に突極性があるため、永久磁石によって得られるトルクに加えて、リラクタンストルク (471 ページの「解説」参照) が利用できる。そこで、リラクタンストルクを使って、IPMSM のトルクが最大になるように電流を制御することで高効率制御する技術を開発した。また、PMSM は、基底速度を超えると誘起電圧がインバータの最大出力電圧より大きくなって運転できなくなるが、電流制御によって端子電圧を抑制することで最高速度を拡大する技術を開発した。

しかしながら、上記の制御を使うとリラクタンストルクの影響で電流とトルクの間線形性がなくなるので、従来は、トルク制御を行うのが困難であった。この問題を解決するため、IPMSM の負荷角に着目した新しい電流制御技術を開発し、高効率制御とトルク線形制御を両立した⁽⁴⁾。

図2にトルク指令に対するトルクを測定した結果を示す。トルクはほぼ指令値に制御できており、定格運転時のトルク制御誤差 3% 以下の高精度トルク制御が達成できている。

なお、実験には、3.7 kW, 1,800 r/min, 6 極の IPMSM を使っており、後に示す他の実験結果も同じである。

③ V/f 制御

図3に V/f 制御のブロック図を示す。V/f 制御は、PMSM の回転子がインバータから供給する電圧の周波数に同期して回転する原理を利用した運転方式である。基本的に、端子電圧の大きさを周波数指令に比例して制御する簡単な方式⁽⁵⁾であるが、電流情報を使って制御性能を高める技術を開発した。以下、制御の特徴について述べる。

3.1 安定化制御

PMSM の V/f 制御は、そのままでは安定性が低く、運転条件によっては持続した振動が発生することが、実験と制御系の安定性解析により明らかになっている。そこで、電流を周波数指令にフィードバックすることで安定な運転を達成している。

図3 V/f 制御のブロック図

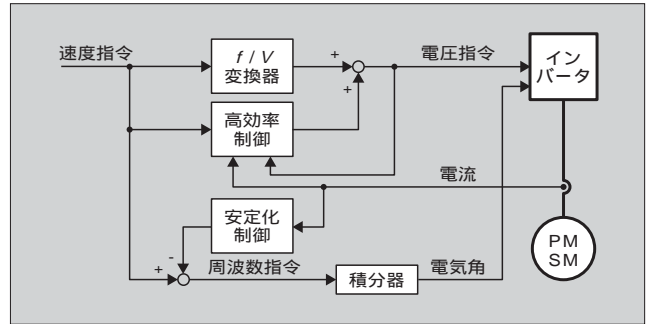
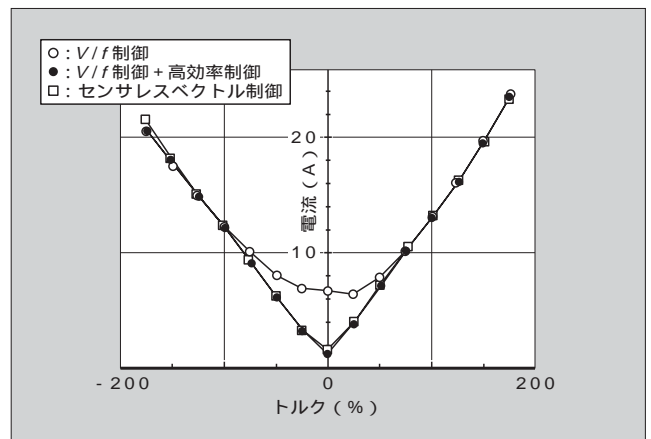


図4 トルク-電流特性



3.2 高効率制御

PMSM は出力トルクの大きさに応じて電圧や電流を最適制御することで効率をよりいっそう高くできる。しかし、V/f 制御に適した高効率制御は過去に例がなく、V/f 制御の大きな課題となっていた。そこで、PMSM の無効電力に着目し、効率を最大にするには、PMSM の無効電力を電流の二乗と速度の積に比例して制御すればよいことを解析により明らかにした。この原理を使って、無効電力が効率最大の条件になるように電圧指令を補正することで、高効率運転を実現している。

図4にトルク - 電流特性を、高効率制御を使った場合と使わない場合、およびセンサレスベクトル制御で比較する。高効率制御により V/f 制御の軽負荷時の電流をセンサレスベクトル制御とほぼ同じに低減できている。

3.3 始動トルクの上向

PMSM の V/f 制御は、ゼロ速度での運転が原理的に不可能であり、低速運転時には、電機子抵抗やインバータの出力電圧誤差の影響によって最大トルクが低下しやすい。これを解決するため、低速時には電流フィードバック制御を併用することによって最大トルクを改善している。

④ センサレスベクトル制御と V/f 制御の特徴比較

図5に速度 - トルク特性を示す。センサレスベクトル制

御は、ゼロ速度から基底速度の 150 % の領域において定格の 150 % 以上の負荷で安定運転できる。V/f 制御の始動トルクは、センサレスベクトル制御には劣るが、定格の 70 % 以上のトルクが得られている。

図5 速度-トルク特性

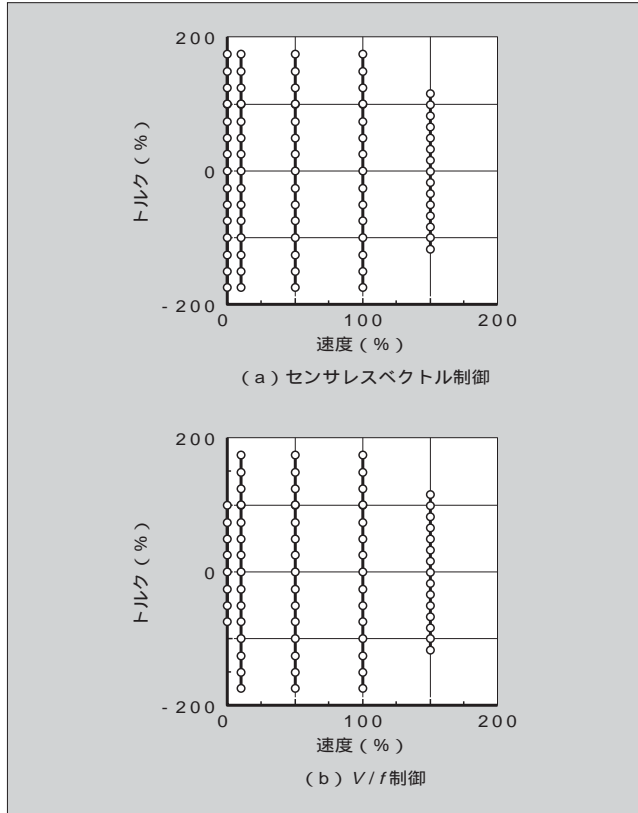


図6 加減速特性

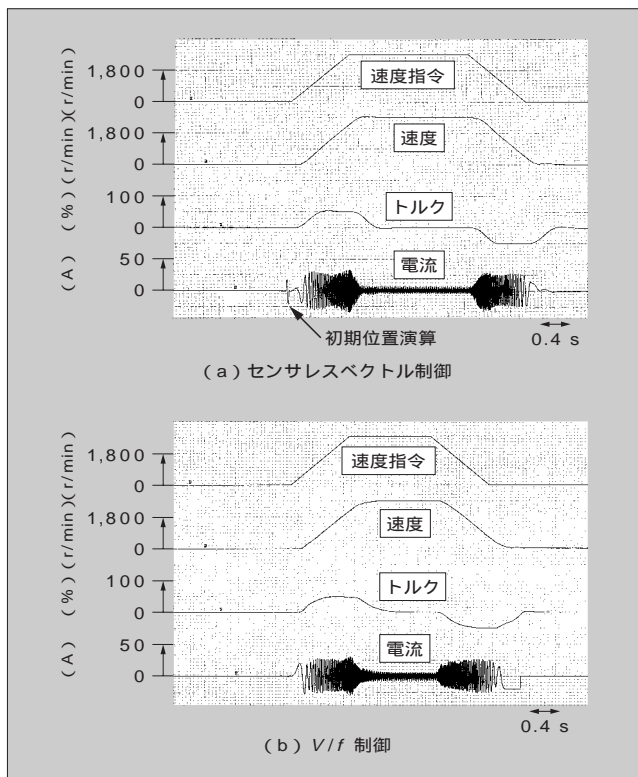


図6に加減速特性を示す。どちらもゼロ速度から基底速度の 150 % まで 0.8 秒で加減速運転できており、特性はほぼ同等である。

図7は負荷ステップ応答である。V/f制御の場合でも、センサレスベクトル制御と同等以上の速度応答が得られている。

表1にセンサレスベクトル制御とV/f制御の特徴を比較して示す。センサレスベクトル制御は、大きな始動トルクが得られ、高精度なトルク制御ができるのが特徴であり、クレーンや垂直搬送装置などに最適である。一方、V/f制御は、安価なハードウェアでセンサレスベクトル制御と同等の高効率と速度応答が得られるのが特徴である。また、高速 PMSM の運転には一般に高性能なマイクロプロセッサが必要であるが、V/f制御は構成が簡単であるので安価なマイクロプロセッサで容易に運転できる。したがって、V/f制御は、ファン、ポンプ、コンプレッサなどに最適で

図7 負荷ステップ応答

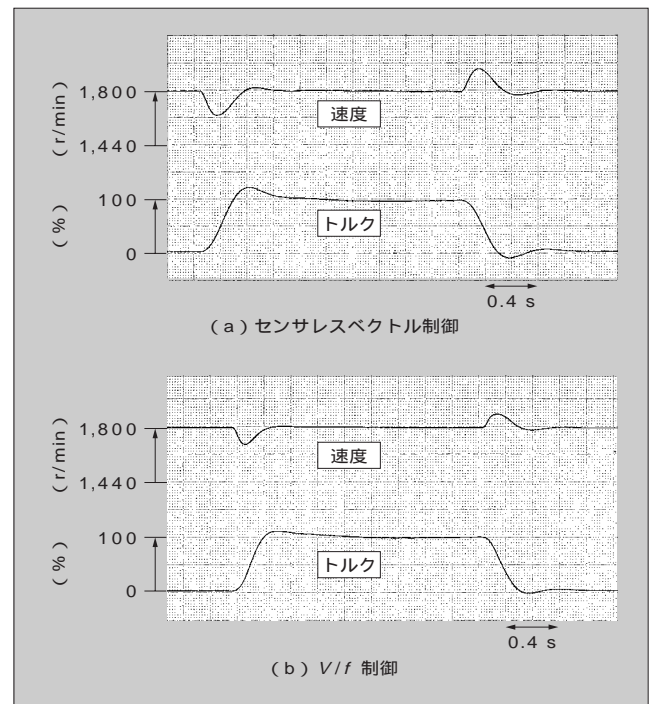


表1 センサレスベクトル制御とV/f制御の特徴比較

項目	センサレスベクトル制御	V/f 制御
価格	高価(ベクトル制御インバータ相当)	安価(汎用インバータ相当)
最低速度	0 %	5 ~ 10 %
始動トルク	150 % 以上	70 % 以上(定格電流時)
トルク制御精度	3 % (定格運転時)	トルク制御不能
モータ効率	89 % (3.7 kW 供試 IPMSM の場合)	
速度応答	15 rad/s 以上	
用途	<ul style="list-style-type: none"> ○大きな始動トルクが必要な用途 ○トルク制御 例: クレーン, 垂直搬送装置	<ul style="list-style-type: none"> ○簡易可変速 ○高速 PMSM 例: ファン, ポンプ, コンプレッサ

ある。

5 あとがき

PMSM のセンサレス制御技術としてセンサレスベクトル制御と V/f 制御について紹介し、おのおのの特徴と性能を比較した。今後とも、市場ニーズに応えるべく、より低価格で使いやすい PMSM ドライブの開発に努力していく所存である。

参考文献

- (1) 糸魚川信夫ほか．同期電動機駆動システム「FESPAC シリーズ」とその適用分野．富士時報．vol.74，no.7，2001，p.405-408．
- (2) 市中良和ほか．高性能ベクトル制御インバータ「FRENIC 5000VG7S」の特殊電動機への適用例．富士時報．vol.74，no.7，2001，p.419-421．
- (3) Aihara, T. et al. Sensorless Torque Control of Salient-Pole Synchronous Motor at Zero-Speed Operation. IEEE Transactions on Power Electronics. vol.14, no.1, January, 1999, p.202-208.
- (4) 野村尚史ほか．センサレス IPM 同期モータドライブのトルク線形制御．電気学会産業応用部門全国大会．2001，p.1257-1260．
- (5) 伊東淳一ほか．永久磁石同期電動機の V/f 制御の高性能化．電気学会論文誌 D．vol.122，no.3，2002，p.253-259．

解説 リラクタンストルク

磁気抵抗のことを英語でリラクタンス (Reluctance) といい、磁気抵抗の非対称性によって発生するトルクをリラクタンストルクという。簡単にいえば、永久磁石により発生するトルクが磁石の N 極と S 極が引き合う力であるのに対して、リラクタンストルクは磁石と鉄が引き合う力である。

埋込磁石構造永久磁石同期電動機 (IPMSM) の場合、d 軸方向 (永久磁石の磁極方向) の磁束は永久磁石を貫くのにに対し、q 軸方向 (d 軸と直交方向) の磁束は回転子鉄心内部を通る。永久磁石の透磁率は空気の透磁率にほぼ等しいので、q 軸方向と比べて d 軸方向の磁気抵抗が大きくなり、回転子の磁気抵抗が非対称になる。このため、IPMSM は永久磁石によるトルクに加えてリラクタンストルクが利用でき、電流や電圧を最適制御することで高効率制御が実現できる。

