

IPM モータのトルク変動解析

埋込磁石構造の IPM モータは永久磁石と固定子のスロットの影響で 1 回転にスロット数分のコギングトルクが発生することはよく知られている。理論的には固定子スロットピッチの 1 ピッチ分スキュー(斜めスロット)すれば影響はなくなる。

しかしながら、鉄心端部での磁束の漏れなどの影響で端部における磁束密度が中心部に比べて低下してくるので、スキュー効果が理論通り得られなくなる。

そこで、電磁界解析を用いてスキュー率に対するコギングトルクの変動解析を実施し、最適値の検討を行った。解析モデルは 3 次元のフルモデルとし、トルクの算定はマックスウェルの応力法を使用している。トルクの算定精度を向上するため要素数はある程度多い方が望ましいが計算機の制限から、このモデルでは 48384 要素、48654 節点としている。ただし、ギャップ部は径方向に 3 分割とし精度の保持に留意している。

図 1 は磁束密度分布を示したもので、図 2 はトルク波形である。モデルは 36 スロットであるため、機械角 10 度は 1 スロットピッチになる。

本解析から、スキュー率の最適値及びスキュー率の効果割合を確認することができた。

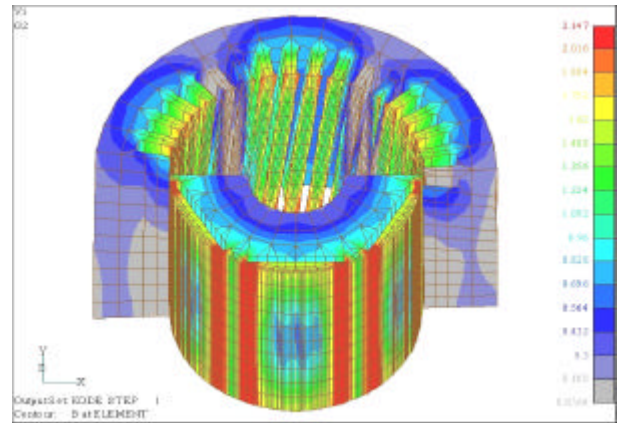


図 1 IPM モータの磁束密度分布

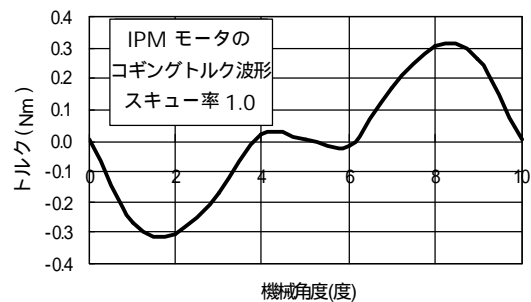


図 2 コギングトルク波形

IPM モータ制御関連: (1)高速・高効率制御

IPM モータは回転子に永久磁石を使用しているので効率が良いことで注目されている。しかし、永久磁石を使用することで速度起電力が大きくなり電圧飽和になりやすい問題がある。そのために本研究では、電圧に余裕がある時は高効率運転となる磁束分電流を選び、電圧飽和付近ではそれを回避する磁束分電流を使用するようにして、両者を無理なく切り替えられるようにしている。

図 1 は IPM モータの制御ブロック図を示す。通常は高効率制御器によって磁束分電流指令 i_d^* が生成される。高効率制御器は、IPM モータがトルク指令 T^* 通りのトルクを出力するのに必要な電流が最小の電流となる i_d^* を生成している。電圧飽和検出器によって電圧飽和が検出されると電流指令通りに制御できなくなるため、電圧飽和を回避するような磁束分電流指令 i_d^* が生成される構成となっている。

図 2 は本システムでの加減速特性結果を示す。速度指令急変時及び 1800[rpm]で 100%負荷投入/しゃ断時に高効率制御または電圧飽和回避の磁束分電流指令 i_d^* が出力されており、実速度 N は素早く速度指令に追従しているのが分かる。速度 1000[rpm], 負荷 100%において、磁束分電流指令 $i_d^* = 0$ と制御した場合に比べて高効率制御では、効率が約 3 ポイント以上アップした実験結果を得ている。

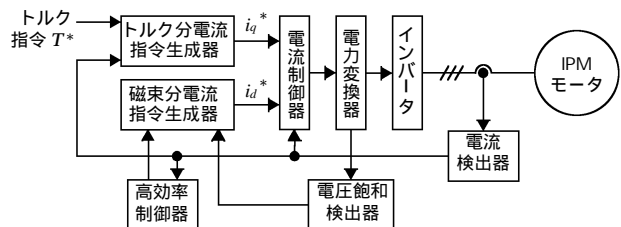


図 1 IPM モータの制御ブロック図

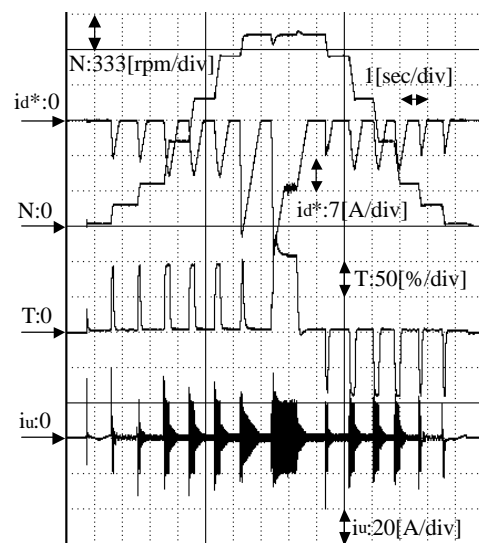


図 2 加減速特性

IPM モータ制御関連: (2) 温度(磁束) 同定

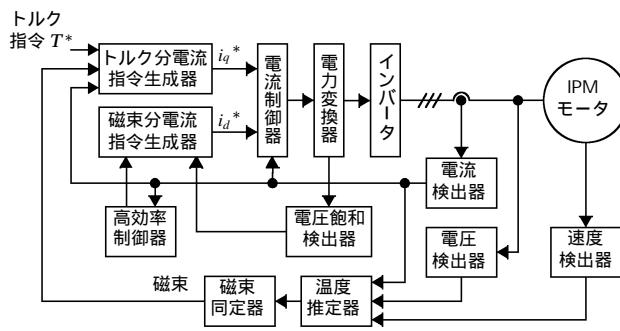
IPM モータは回転子に永久磁石を使用しているが、永久磁石の磁束 f は温度変化によって変動する特性がある。IPM モータの出力トルクは、トルク分電流 i_q によって制御されており、このトルク分電流指令 i_q^* は、永久磁石の磁束 f を用いている。よって、IPM モータの温度変化によって f が変化すると、出力トルクがトルク指令 T^* 通りに制御できなくなるという問題がある。本研究では、IPM モータの温度変化を推定し、この推定温度変化を用いて永久磁石の磁束の同定を行うことを検討した。

図は IPM モータの温度推定ブロック図を示す。温度推定器は、IPM モータの入力電圧、入力電流と回転速度 w から IPM モータの温度変化を推定する。その推定原理を説明する。IPM モータの q 軸電圧 v_q は、次式で表される。

$$v_q = w \cdot L_d \cdot i_d + (R + p \cdot L_q) \cdot i_q + w \cdot f \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 L_d 、 L_q は d 、 q 軸インダクタンス、 i_d は磁束分電流、 R は巻線抵抗、 p は微分演算子である。この式を永久磁石の磁束 f で解くことで f を求めることができるが、 $w = 0$ 付近の低速では不可能であり、また温度で変化する巻線抵抗 R の誤差の影響も受ける。そこで、直接 f を求めるのではなく、温度変化を推定してから磁束を推定するようにする。(1)式で IPM モータの温度変化によって変動するものは、永久磁石の磁束 f

と巻線抵抗 R であるので、 f と R を温度変化の関数として(1)式に代入することで、IPM モータの温度変化を推定することができる。この温度変化推定は、 R も温度変化の関数として加えることで、高速だけでなく低速域でも推定可能である。よって、温度推定器により推定された IPM モータの温度変化を用いて、磁束同定器は永久磁石の材料特性から永久磁石の磁束 f を全速度範囲で同定することができる。トルク分電流指令生成器では、同定した永久磁石の磁束を用いてトルク分電流指令 i_q^* を生成しているため、温度変化によって永久磁石の磁束 f が変動しても精度よく IPM モータの出力トルク T を制御することが可能となる。



IPM モータの温度推定ブロック図

瞬時ひずみ最小化 PWM 変調法の開発

高調波規制で、スイッチング制御方式の評価は、ひずみ特性が益々重要視されつつある。このため、我々は瞬時値制御方式に対して、制御周期に発生する総合ひずみ率(THD)を評価して、最適なタイミングでベクトルを切替える「瞬時ひずみ最小化制御法」を提案し、その有効性を検証した。

本研究はその「ひずみを評価してスイッチングタイミングを最適に決定する」という考え方を三相 PWM 変換器(図1)の PWM 変調方法に拡張したものである。

PWM 変調において、所望の平均電圧を得るために、スイッチングタイミング (a) に自由度があることはよく知られている。すべては次のように表すことができる。

$$a_j = b_j + g \quad j = 1, 2, 3$$

ここで、 b_j は所望の電圧指令値により一意に定まる基本タイミングであり、 g は、 $0 \leq a_j \leq 1$ を満たす任意に決められるフリーパラメータである。

g の値により、制御周期内に電流の動きが違うので、発生する電流ひずみの大きさも異なる。一制御周期に発生する電流ひずみ(THD)は次式より定義され、電流誤差 $s(t)$ より求められることが分かる。

$$D(g) = \int_0^1 \|s(t, g)\|^2 dt$$

提案変調法では、この定義を直接の評価関数とし、それが最小値になる最適タイミング (g^{opt}) の解を導いている。

最適解の導出は、定常状態等の仮定を設けず、また物理的に発生できるタイミングの範囲内で行われたものなので、過渡・定常、負荷条件を問わず、電流ひずみを原理的に最小に抑えられるとともに、最大変調率も理論値まで確保できる。提案変調法の有効性は実験よりも検証されている。

提案変調法を適用する場合、電流制御系を含むシステムのブロック図は図2に示される。

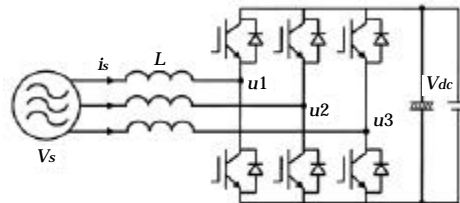


図1 三相電力変換コンバータ

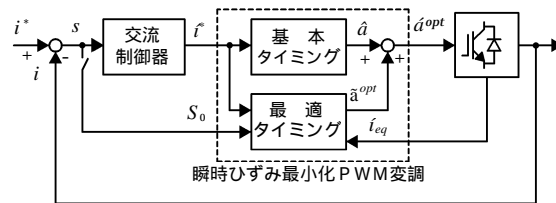


図2 提案 PWM 変調法の原理を示すブロック図

3 慣性バックラッシねじれ軸系のトルク制御

図1のように電動機と負荷機がギアと軸で結合されると、機械共振系となりギア歯のバックラッシ振動と軸のねじれ振動による機械破損の恐れがある。3 慣性バックラッシねじれ軸系のトルク制御には、3 慣性系を2 慣性系に近似して、PID 制御または2 自由度P-ID 制御を簡単に設計できるが、これらの制御器を3 慣性系に適用すると、安定な制御ができない。

そこで、図2のようにPID 制御器 $F1(s)$ と外乱オブザーバを利用したフィードバック制御器 $F2(s)$ とフィードフォワード制御器 $F3(s)$ を併用する2 自由度制御方式を提案し、指令追従特性が改善できることをシミュレーションにより確認した。

図3の周波数応答特性のように3 慣性バックラッシねじれ軸系は、開ループのゲイン特性に共振周波数の ω_1 と ω_2 で高いピークが生じ、軸ねじれ振動とギア歯のバックラッシ振動が発生しやすい。

2 慣性系で設計した2 自由度P-ID 制御を適用すると、ゲイン特性のピークが抑えられるが、位相特性に進み現象が見られ、これは閉ループ系に不安定極が存在するため、安定な制御ができない。提案のトルク制御を適用すると、共振周波数 ω_1 と ω_2 の二つのピークを両方ともおさえられ、機械共振を抑制すると同時に良好な指令追従性を達成できることが分かる。

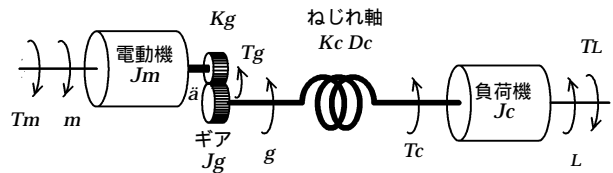


図1 3 慣性バックラッシねじれ軸系モデル

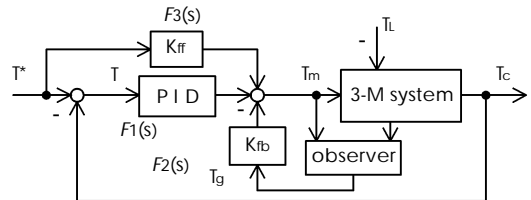


図2 提案の2 自由度トルク制御系の構成

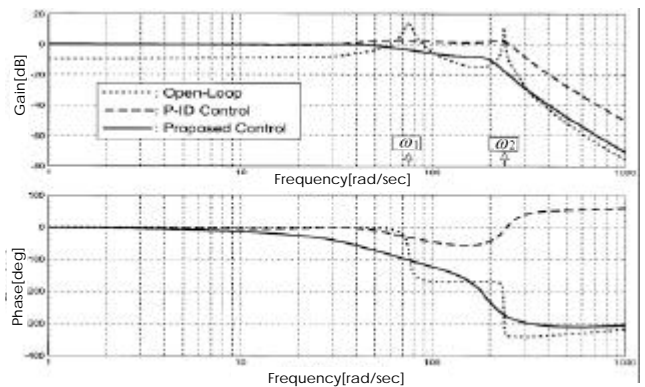


図3 周波数応答特性

車両用誘導電動機の絶縁評価

車両用主電動機として誘導電動機が実用化され、運用されてから十数年が経過した。誘導主電動機は小形軽量化と長寿命化を確保するため耐熱温度の高いC種絶縁システムが採用されているが、初期に供用された誘導電動機は絶縁診断が必要な時期が近くなっているため、誘導電動機を対象とした新たな絶縁診断法を開発する必要性が高まってきている。

誘導主電動機の絶縁診断技術開発にあたっては、最近の先端技術を取り入れて短時間 簡便 精度が良いことを目標とした。

診断項目としては、従来からの電気的な特性試験及び、外観検査などに加えて、物理化学的な項目も新たに加えて総合的な診断が行えるように考慮した。

一方、得られた各種データをもとに絶縁診断を行うツールとして、今回はコンピュータによる各種手法を比較検討した結果ニューラルネットワークを用いることとした。

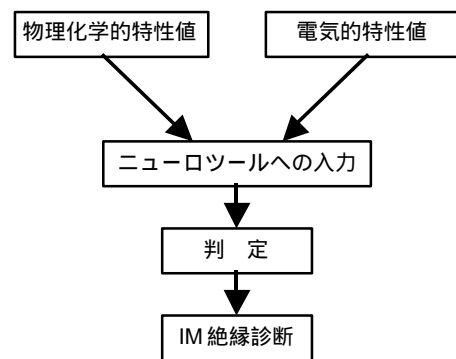
開発に際しては、実機を模した誘導電動機の固定子コイルを作成し通電加熱により劣化させ、一定時間ごとに各種診断項目を測定し最後に絶縁破壊試験を行った。

ニューラルネットワークに各種診断データと絶縁破壊電圧値との関係を学習させて、残存破壊電圧値推定モデルを作成し

その推定精度を調べた。

その結果、電気的特性に物理化学的特性を加えて学習させたモデルは推定精度の高いことが分かった。

以上のことから、上記のモデルコイルを使用した診断手法は実機に適用可能と考えられるので、今後は実機に適用したときに、当初の目標（短時間、簡便、精度が良い）が達成できるように、更にデータを蓄積して、顧客のご要望に応じていく所存である。



IM 絶縁診断の流れ