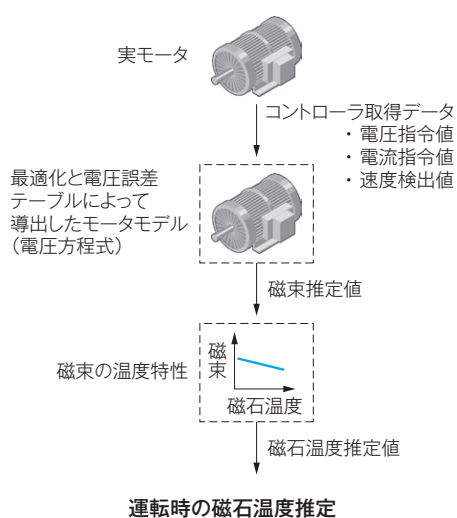


永久磁石式同期電動機（PM モータ） における磁石温度推定の基礎検討

安部義隆 Yoshitaka Abe
滝口昌司 Masashi Takiguchi

キーワード PM モータ, 磁石温度推定, 最適化, 電圧誤差

概要



永久磁石式同期電動機（PM モータ）の回転子磁石は、温度が上昇し過ぎると不可逆減磁するという課題がある。回転子磁石の温度を計測できれば、温度に応じた出力制限や異常停止などの保護ができる。しかし、磁石は回転子に固定されているため、モータ駆動中の温度を直接計測することは通常行われぬ。これらの背景から、モータ駆動中の磁石温度の推定が求められている。

電圧方程式に基づき磁石温度を推定する方式があるが、電圧誤差とパラメータ変動が推定精度に大きく影響し、これらは運転条件によって変動する。高調波を重畳してこれらを同定する手法を用いることが多いが、高調波重畳は騒音や振動、損失の増加といった難点がある。そこで、あらかじめ取得したデータから運転条件ごとに最適パラメータ及び電圧誤差テーブルを導出し、これらを用いて温度を推定した。

1 まえがき

永久磁石式同期電動機（PM モータ）は、その小形・軽量・高効率といった特長から、電気自動車をはじめ、社会インフラ設備や産業分野に広く適用されている。これらの適用先で、PM モータの駆動システムは高い信頼性が求められている。一方でPM モータの回転子磁石は、温度が上昇し過ぎると不可逆減磁するといった課題がある。回転子磁石の温度を計測できれば、温度に応じた出力制限や停止などの保護ができる。しかし、磁石は回転子に固定されているため、モータ駆動中の温度を直接計測することは通常行われぬ。これらの背景から、モータ駆動中の磁石温度の推定が求められている。

磁石温度の推定技術の主な方式の一つとして、磁石による磁束をモータの電圧方程式から推定し、磁

石磁束の温度特性から磁石温度を推定する方式がある。この方式は演算にモータパラメータを用いるため、その精度が推定精度に影響する。またモータの印加電圧を検出するセンサを備えていない場合には、インバータの電圧指令値を用いて推定演算を行うことになるため、インバータによる電圧誤差の影響もある。よってこの方式の課題は、電圧方程式の正しいパラメータを取得することである。この解決策として、高調波を重畳してパラメータを同定する手法⁽¹⁾⁽²⁾が用いられることが多いが、高調波重畳は騒音や振動、損失の増加といった難点がある。また、電圧誤差の課題も残る。本稿では、パラメータ変動と電圧誤差という電圧方程式に基づく手法の課題に対し、これらをあらかじめ同定する手法を採用し、高調波重畳をせずとも高精度に磁石温度を推定する方法を開発したので紹介する。

2 試験機の構成

第1図に磁石温度推定の構成を示す。図中の i_u, i_v, i_w はモータに流れる三相電流, i_d, i_q はdq軸電流, v_d, v_q はdq軸電圧, ppはモータの極対数, θ_m, θ_e はモータ回転子の機械角, 電気角, ω_e はモータの電気角速度, T_{pm} は磁石温度である。ただし, *は指令値, ^は推定値を表している。被試験モータは定格75kW, 6640min^{-1} の磁石埋込型モータを用い, 負荷用のモータをカップリングしている。被試験モータは電流制御, 負荷モータは速度制御を行う構成とした。被試験モータは, 磁石の温度を計測するため磁石に熱電対を取り付けている。

3 定常状態の電圧方程式に基づく磁石温度推定

3.1 磁石温度推定式の導出

PMモータのdq座標系における電圧方程式を基に磁石温度推定式を導出する。PMモータのdq軸電圧方程式を式(1)に示す。

$$\begin{bmatrix} v_d^* \\ v_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + L_d \frac{d}{dt} & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R_a + L_q \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \Phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta V_d \\ \Delta V_q \end{bmatrix} \quad \dots\dots(1)$$

ただし, L_d, L_q はdq軸インダクタンス, Φ は磁石による磁束, R_a は抵抗, $\Delta V_d, \Delta V_q$ はインバータにより生じるdq軸の電圧誤差である。磁石温度と磁

束の関係は式(2)のように一次近似で表される。

$$\Phi = \Phi_n \{1 + \beta (T_{pm} - T_0)\} \quad \dots\dots(2)$$

ただし, T_0 は基準温度, Φ_n は基準温度における磁束, β は磁束温度係数である。定常状態を考え式(1)の $di_q/dt \cong 0$ として, 式(1)に式(2)を代入し, q軸側の方程式を T_{pm} について整理すると, 式(3)の磁石温度推定式を得る。

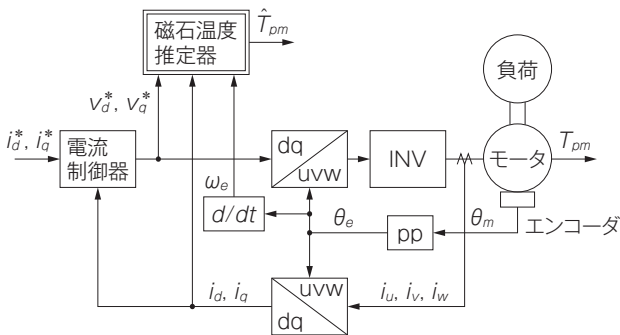
$$\hat{T} = T_0 + \frac{\{v_q^* - R_a i_q - (L_d i_d + \Phi_n) \omega_e - \Delta V_q\}}{\Phi_n \beta \omega_e} \quad \dots\dots(3)$$

3.2 パラメータ変動の影響

式(3)から磁石温度を推定できるが, モータパラメータを用いるため, 推定演算に用いるパラメータと実機間に差異があると推定誤差が生じる。

パラメータ変動が温度推定誤差に与える影響について, 偏微分を用いた感度解析を行った⁽³⁾。第1表に $i_d = -40\sqrt{3}\text{A}$, $i_q = 60\sqrt{3}\text{A}$ の時の結果を示す。 ΔV_q が温度推定に与える影響が非常に大きく, またその影響は高速であるほど小さくなることが確認できる。またモータパラメータの変化の影響という観点では Φ_n の影響が大きい。

以上の解析から, モータパラメータの変動と電圧誤差が温度推定に与える影響を定量的に示すことができた。この結果から, 高精度な温度推定のためには, 正確なパラメータを用いる必要があることを確認した。



第1図 磁石温度推定の構成

システム構成を示す。磁石温度推定ブロックは, dq軸電圧参照値・dq軸電流・モータの電気角速度を入力とし, 磁石温度推定値を出力する。

第1表 感度解析

パラメータの変動が温度推定値に及ぼす影響を示す。電圧誤差とパラメータ変動が温度推定誤差に大きな影響を与えている。

$$i_d = -40\sqrt{3}\text{A}, i_q = 60\sqrt{3}\text{A}$$

速度指令 (min^{-1})	ΔV_q ($^{\circ}\text{C}/\text{V}$)	Φ_n ($^{\circ}\text{C}/\%$)	β ($^{\circ}\text{C}/\%$)	L_d ($^{\circ}\text{C}/\%$)	R_a ($^{\circ}\text{C}/\%$)
1200	28.45	12.25	2.58	-1.27	0.235
1800	18.96	11.04	1.37	-1.26	0.157
2400	14.20	10.28	0.61	-1.26	0.118

4 最適化によるパラメータ導出

磁石温度を精度よく推定するためには、モータパラメータと電圧誤差の正確な値を用いる必要がある。しかし、モータパラメータは運転条件によって変動し、電圧誤差も電流位相によって変化するため、運転条件ごとにパラメータを用意することが望ましい。そこで、磁石温度推定誤差を最小とする最適化問題を定式化し、運転条件ごとのモータパラメータと電圧誤差を計算する。

4.1 最適化問題への定式化

磁石温度推定のためのパラメータ導出は、「磁石温度計測値と推定値の誤差を最小とするパラメータの最適化問題」として表現することができる。ただし、パラメータは物理的に妥当な範囲内である必要があるため、制約付き最適化問題として次のような式(4)として定式化できる。

$$[\Phi_n, \beta, L_d, R_a, \Delta V_q]^{\text{opt}} = \arg \min_{\Phi_n, \beta, L_d, R_a, \Delta V_q} (T_{pm} - \hat{T})^2 \quad \dots\dots(4)$$

拘束条件

$$\hat{T} = T_0 + \frac{\{v_q^* - R_a i_d^* - (L_d i_d^* + \Phi_n) \omega_e - \Delta V_q\}}{\Phi_n \beta \omega_e} \quad \dots\dots(4a)$$

$$\Phi_n^{\min} \leq \Phi_n \leq \Phi_n^{\max} \quad \dots\dots(4b)$$

$$\beta^{\min} \leq \beta \leq \beta^{\max} \quad \dots\dots(4c)$$

$$L_d^{\min} \leq L_d \leq L_d^{\max} \quad \dots\dots(4d)$$

$$R_a^{\min} \leq R_a \leq R_a^{\max} \quad \dots\dots(4e)$$

$$\Delta V_q^{\min} \leq \Delta V_q \leq \Delta V_q^{\max} \quad \dots\dots(4f)$$

ただし、上付き文字opt, min, maxはそれぞれ最適値, 最小値, 最大値を表す。各パラメータの最大値と最小値は設計値を基準に任意に設定する。

4.2 パラメータの段階的導出

最適化問題式(4)を直接解くことは不可能ではないが、パラメータが多いと妥当な値に収束しない場合がある。そこで、次のように最適化問題を段階的に解き、パラメータの少ない問題とすることで、よ

り妥当なパラメータを導出する。

(1) Φ_n と β は、モータを負荷機から回転させ、その時の無負荷誘起電圧と磁石温度を計測することで、横軸を磁石温度、縦軸を磁束とするグラフを作成する。磁束は無負荷誘起電圧とモータ回転速度から求めることができる。作成したグラフから最小二乗法によって一次近似の直線を導出し、式(2)との係数比較から Φ_n と β を算出することができる。

(2) L_d と ΔV_q は、まず $i_d < 0$, $i_q = 0$ となる複数の運転条件での定常状態のデータを取得する。 $i_d < 0$ としているのは、PMモータでは通常 $i_d > 0$ で駆動することはないためである。この運転条件では $i_q = 0$ であるため、最適化問題式(4)は次の式(5)として簡略化される。

$$[L_d, \Delta V_q]^{\text{opt}} = \arg \min_{L_d, \Delta V_q} (T_{pm} - \hat{T})^2 \quad \dots\dots(5)$$

拘束条件

$$\hat{T} = T_0 + \frac{\{v_q^* - \Phi_n \omega_e - L_d \omega_e i_d^* - \Delta V_q\}}{\Phi_n \beta \omega_e} \quad \dots(5a)$$

$$L_d^{\min} \leq L_d \leq L_d^{\max} \quad \dots\dots(5b)$$

$$\Delta V_q^{\min} \leq \Delta V_q \leq \Delta V_q^{\max} \quad \dots\dots(5c)$$

(3) R_a と ΔV_q は、まず $i_d = 0$, $i_q > 0$ (又は $i_d = 0$, $i_q < 0$)となる複数の運転条件での定常データを取得する。この運転条件では $i_d = 0$ であるため、最適化問題式(4)は式(6)として簡略化される。

$$[R_a, \Delta V_q]^{\text{opt}} = \arg \min_{R_a, \Delta V_q} (T_{pm} - \hat{T})^2 \quad \dots\dots(6)$$

拘束条件

$$\hat{T} = T_0 + \frac{\{v_q^* - \Phi_n \omega_e - R_a i_q^* - \Delta V_q\}}{\Phi_n \beta \omega_e} \quad \dots\dots(6a)$$

$$R_a^{\min} \leq R_a \leq R_a^{\max} \quad \dots\dots(6b)$$

$$\Delta V_q^{\min} \leq \Delta V_q \leq \Delta V_q^{\max} \quad \dots\dots(6c)$$

(1)~(3)のプロセスを踏むことで、一つの最適化問題あたりパラメータは二つと少なくできる。

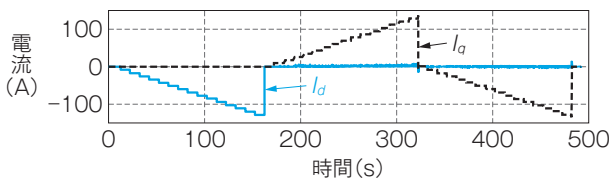
4.3 パラメータ導出から温度推定の流れ

パラメータ導出からの温度推定は四段階として、データ取得・前処理・最適化・温度推定の流れで進

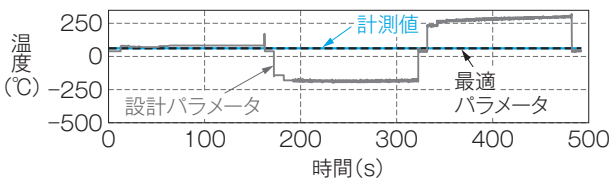
める。

(1) データ取得 負荷側からモータを定速回転させながら、各電流条件でモータを駆動した際のデータを取得する。ただしパラメータの段階的導出のため、 i_d 又は i_q のどちらかの電流は0とする必要がある。第2図に磁石温度推定の実験結果を示す。「 $i_d < 0$ かつ $i_q = 0$ 」・「 $i_d = 0$ かつ $i_q > 0$ 」・「 $i_d = 0$ かつ $i_q < 0$ 」の電流条件で、階段状に変化させている。モータの回転数を変えて同様のデータ取得を繰り返す。

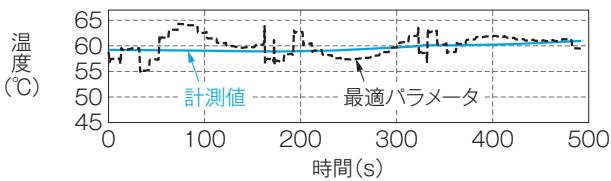
(2) 前処理 各電流条件で、電流が一定となっている定常状態の期間のデータを抽出し、各計測変数の平均値を取得する。



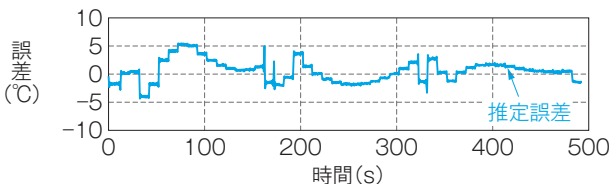
(a) dq軸電流



(b) 磁石温度



(c) 磁石温度(拡大図)



(d) 推定誤差

第2図 磁石温度推定の実験結果

最適パラメータと設計パラメータでの温度推定について、実験結果の比較を示す。(b)の比較から、最適パラメータによって推定精度が改善している。

(3) 最適化 計測結果の平均値のデータを用いて、最適化問題を各電流の符号条件ごとに解く。具体的には、「 $i_d < 0$ かつ $i_q = 0$ 」は式(5)を適用し、「 $i_d = 0$ かつ $i_q > 0$ 」・「 $i_d = 0$ かつ $i_q < 0$ 」は式(6)を適用する。これらの最適化問題を解くことで、電流の符号条件ごとに最適なパラメータが算出される。

(4) 温度推定 電流の符号条件に応じて算出したパラメータを読み出し、磁石温度推定値を算出する。

4.4 実機検証の結果

第1図の構成で4.3項の手順を踏み、温度推定を検証した。被試験モータの回転数は 1800min^{-1} で一定とし、第2図(a)の電流条件で磁石温度が 50°C 付近の時と 60°C 付近の時のデータを取得した。今回、磁石温度が 50°C 付近のデータでパラメータを算出し、算出したパラメータを用いて 60°C 付近のデータで温度推定を行った。最適化問題によるパラメータの算出は、電流が各電流の符号条件ごとに解くだけでは推定精度が悪かったため、電流の小さい領域のデータと大きい領域のデータで分けてパラメータを算出した。推定精度が悪かった理由としては、電流の小さい領域ではq軸電圧誤差の非線形性が強いと考えられる。第2図(b)~(d)に 60°C 付近のデータで磁石温度を推定した結果を示す。(b)は磁石温度の計測値、設計パラメータを用いた場合の推定値(q軸電圧誤差 $\Delta V_q = 0$ としている)、算出した最適パラメータを用いた場合の推定値である。設計パラメータを用いた推定結果は ΔV_q の影響を考慮できていないこともあり、特に $i_q \neq 0$ のときの誤差が非常に大きく、推定できていない。(c)・(d)は、温度推定値の縦軸を拡大したものと推定誤差を示している。これらの結果から、算出した最適パラメータを用いることで、誤差 5°C 程度で推定できていることが確認できる。

5 q軸電圧誤差のテーブルによる補償

4項の手法は、 i_d 又は i_q のどちらかが0という条件でパラメータを導出するため、 $i_d \neq 0$ かつ $i_q \neq 0$ の電流条件には適用できない。特にq軸電圧誤差 ΔV_q

は電流位相によって変化するため、 $i_d = 0$ 又は $i_q = 0$ の条件で導出された値から大きく乖離する。

そこで、磁石温度の推定演算に用いる q 軸電圧誤差 ΔV_q をモータの運転条件ごとに求め、テーブル化することで、「 $i_d \neq 0$ かつ $i_q \neq 0$ 」となる条件も含めた全電流条件での温度推定を可能とする。まず、q 軸電圧誤差の理論式から dq 軸電流条件ごとに q 軸電圧誤差を求める必要があることを示し、次に ΔV_q テーブルの算出方法及び推定の方法を説明する。

5.1 q 軸電圧誤差のモデル

dq 軸の電圧誤差は、一般的に次のようにモデル化される⁽²⁾。

$$\begin{bmatrix} \Delta V_d \\ \Delta V_q \end{bmatrix} = \Delta V \begin{bmatrix} D_d \\ D_q \end{bmatrix} \dots\dots\dots(7)$$

$$\begin{bmatrix} D_d \\ D_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \cos \left(\theta_e - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_e + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta_e & -\sin \left(\theta_e - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta_e + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{sgn}(i_u) \\ \text{sgn}(i_v) \\ \text{sgn}(i_w) \end{bmatrix} \dots\dots(8)$$

ただし、 ΔV は一相あたりの電圧誤差であり、デッドタイム誤差と半導体素子の電圧降下による誤差の和である。

式(7)・(8)から、dq 軸電圧誤差は、回転子位置と三相電流の極性との関係、つまり電流位相によって変化すると言え、dq 軸電流に応じて dq 軸の電圧誤差が変化することを示している。

5.2 q 軸電圧誤差の算出

電圧誤差は dq 軸の電流で変化するため、モータの動作条件ごとに電圧誤差を算出する必要がある。磁石温度推定値は式(3)で演算できるが、この時、 $\Delta V_q = 0$ として演算した磁石温度推定値 $\hat{T}_{w.o.\Delta V_q}$ と磁石温度検出値 T_{pm} の差が ΔV_q によるものとして、式(9)・(10)によって ΔV_q を求める。

$$\hat{T}_{w.o.\Delta V_q} = T_0 + \frac{\{v_q^* - R_a i_q - (L_d i_d + \Phi_n) \omega_e\}}{\Phi_n \beta \omega_e} \dots\dots(9)$$

$$\Delta V_q = (T_{pm} - \hat{T}_{w.o.\Delta V_q}) \Phi_n \beta \omega_e \dots\dots(10)$$

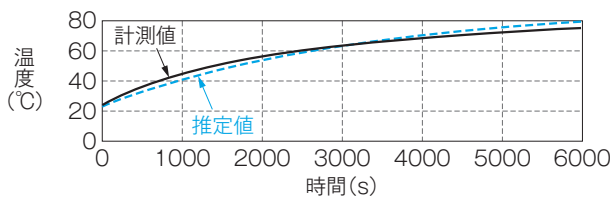
5.3 q 軸電圧誤差テーブルの算出から温度推定までの流れ

q 軸電圧誤差テーブルの算出から温度推定までのフローは 4.3 項と同様に大きく四つに分けられる。データ取得・前処理・q 軸電圧誤差テーブルの算出・温度推定の流れで進める。ただし、q 軸電圧誤差以外のモータパラメータは 4 項で導出したものを用いる。

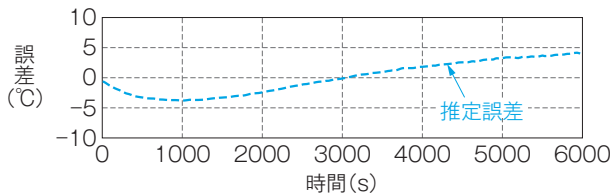
- (1) データ取得 モータの回転数を一定とし、 $i_d \neq 0$ かつ $i_q \neq 0$ の条件を含めた様々な電流条件でモータを駆動した際のデータを取得する。ただし、定常状態のデータを取得するため、電流が一定となっている期間を設ける必要がある。回転数の条件も変えて、同様にデータ取得を繰り返す。
- (2) 前処理 各電流条件で、電流が一定となっている定常状態の期間のデータを抽出し平均値を取得する。
- (3) q 軸電圧誤差テーブルの算出 平均値のデータを基に式(9)・(10)を計算し、電流条件ごとの q 軸電圧誤差を算出する。算出した q 軸電圧誤差を用いてモータの速度条件ごとに i_d 、 i_q に関するテーブルデータを作成する。取得した動作条件の間のデータは線形補間した値を用いる。
- (4) 温度推定 運転条件に応じて 4 項で導出したモータパラメータと q 軸電圧誤差を読み出し、磁石温度推定値を算出する。

5.4 実機検証結果

4 項で示したモータパラメータの導出と 5.2 項に示す q 軸電圧誤差の算出を基に、q 軸電圧誤差算出用とは別の検証用の運転データを用いて温度推定の実験を行った。第 3 図と第 4 図に回転数 1800min^{-1} で駆動した際の結果を示す。第 3 図は、dq 軸電流を一定として磁石温度を上昇させた場合の結果である。磁石温度が変化しても誤差 5°C 以下で良好に推定できていることが確認できる。第 4 図は、dq 軸電流を変化させながら磁石温度を変化させた場合の結果で、(a) は検証時の dq 軸電流、(b)・(c) は磁石温度の推定結果である。おおむね 10°C 以内の精度で推定できているが、推定誤差に



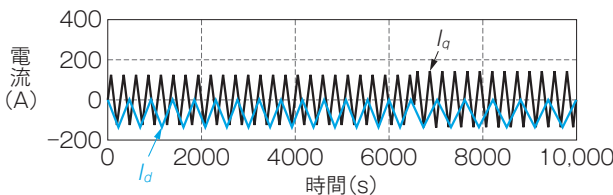
(a) 磁石温度



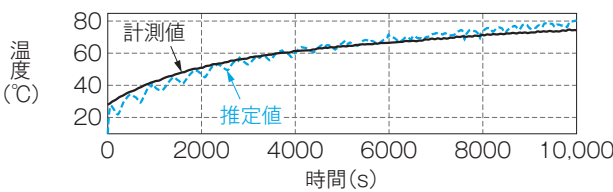
(b) 推定誤差

第3図 dq軸一定電流における電圧誤差補償の実験結果

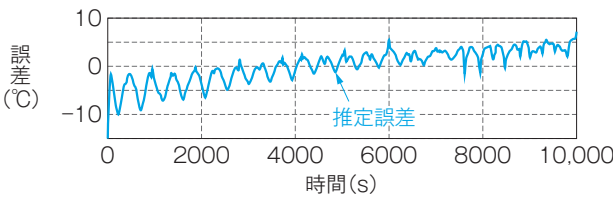
dq軸電流を一定とした際の電圧誤差補償を付加した温度推定の結果を示す。最大誤差が5°C程度である。



(a) dq軸電流



(b) 磁石温度



(c) 推定誤差

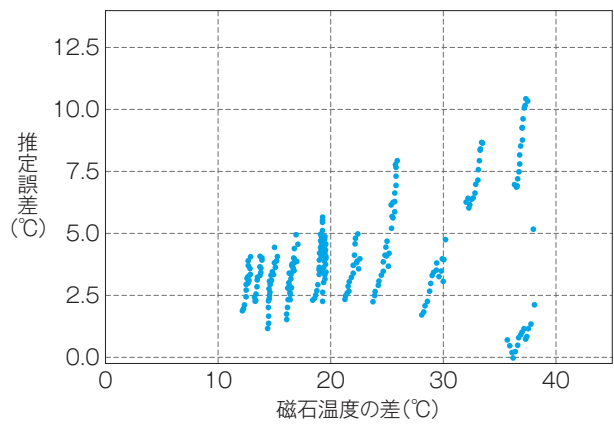
第4図 dq軸可変電流における電圧誤差補償の実験結果

dq軸電流を変化させた際の電圧誤差補償を付加した温度推定の結果を示す。最大誤差が10°C程度である。

d軸電流の変化に同期したような振動が見られる。

5.5 誤差要因と対策

保護の観点では高温時の磁石温度推定のみがで



第5図 推定誤差と磁石温度の差の関係

推定誤差と磁石温度の差の関係を示す(1800min⁻¹, q軸電流が正の場合)。推定誤差が大きい結果となるのは、パラメータ算出用・検証用データ間の磁石温度の差が大きい時である。

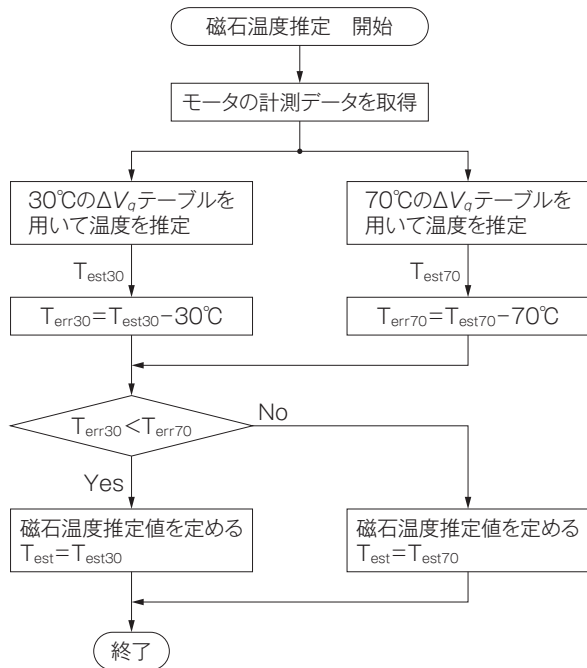
できればよいが、本項では広い温度範囲での推定精度向上も考える。誤差要因の解析⁽³⁾から、パラメータ算出用データ取得時と検証用データ取得時での磁石温度の差が推定誤差に関連することが分かった。

第5図に推定誤差と磁石温度の差の関係を示す。磁石温度の差が大きい時に推定誤差が大きくなる場合がある。そこで、広範囲の温度条件で推定精度を向上させるため、次の対策をとる。

- (1) 複数の温度条件でパラメータ算出用データを取得し、温度条件ごとにq軸電圧誤差テーブルを導出
- (2) 温度条件に応じてq軸電圧誤差テーブルを切り替え、推定温度を算出

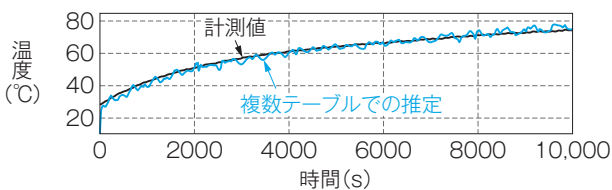
今回は、磁石温度が30°Cと70°Cの2条件のデータを用いて、それぞれq軸電圧誤差テーブルを作成した。推定に用いる電圧誤差テーブルの切り替えは第6図に示すフローで行った。30°Cと70°Cの条件で作成した電圧誤差テーブルを用いてそれぞれ温度推定値(T_{est30} , T_{est70})を算出し、推定した温度と電圧誤差テーブル算出時の磁石温度計測値との差(T_{err30} , T_{err70})が小さい方の推定結果を最終的な推定温度(T_{est})として採用する。

この対策を用いて第4図と同じ検証用データで温度推定を行った結果を第7図に示す。推定誤差が5°C程度となり、第4図の結果と比べ推定精度が改善し、対策の効果を確認できた。

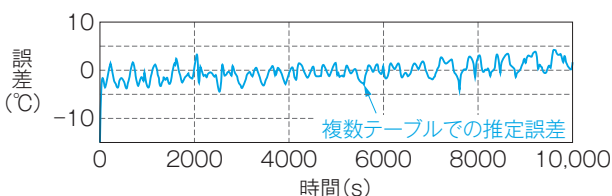


第6図 複数のテーブルを用いた温度推定のフロー

複数のテーブルを用いた電圧誤差補償の算出フローを示す。



(a) 磁石温度



(b) 推定誤差

第7図 dq軸可変電流における複数のテーブルを用いた電圧誤差補償の実験結果

複数のテーブルを用いた電圧誤差補償の結果を示す。最大誤差が5°C程度となり改善した。

6 むすび

パラメータ変動と電圧誤差をあらかじめ同定することで磁石温度推定を行う手法を紹介した。

本手法は、あらかじめ磁石温度を含めたデータ取得が必要となるが、推定時に高調波を重畳することなく、推定誤差5°C程度の高精度な温度推定が得られることを試験機で確認した。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) 加藤崇, 佐々木健介, Fernandez Diego, Fernandez Daniel, Reigosa David: 「磁石磁束鎖交数オブザーバを用いた可変漏れ磁束型IPMSMにおける磁石温度推定手法」, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), Vol.140, No.4, pp.265-271, 2020
- (2) 森本茂雄・神名玲秀・真田雅之・武田洋次: 「パラメータ同定機能を持つ永久磁石同期モータの位置・速度センサレス制御システム」, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), Vol.126, No.6, pp.748-755, 2006
- (3) 安部義隆・滝口昌司・野村昌克・漆畑正太: 「パラメータ最適化と電圧誤差補償を用いたPMモータの磁石温度推定」, 電気学会モータドライブ研究会, MD-24-023, 2024

《執筆者紹介》



安部義隆
Yoshitaka Abe
先進技術研究所
計測制御の研究開発に従事



滝口昌司
Masashi Takiguchi
先進技術研究所
パワーエレクトロニクス・モータの研究開発に従事