

# 集中巻 IPM モータの空間高調波に着目した 磁極位置推定法の実験検証

新開克巳\* 野口 季彦 (長岡技術科学大学)

Experimental Verification of Spatial Harmonics Based Rotor Position Estimation Method for IPM Motor with Concentrated Windings  
Katsumi Shingai, and Toshihiko Noguchi (Nagaoka University of Technology)

## 1. はじめに

集中巻 IPM モータは固定子鉄心が特殊な形状となるため多くの空間高調波を発生させる。この空間高調波は不均一な磁路における磁気抵抗の変動によって発生するため、ベクトル制御で必要となる回転子から観測したインダクタンス  $L_d$ ,  $L_q$  は回転角に依存すると考えられる。本論文では集中巻 IPM モータの回転子から観測したインダクタンス  $L_d$ ,  $L_q$  が回転角依存性をもつことに着目し、その変動に起因する電流制御ループの操作量リップルに基づいて磁極位置を推定する手法を実験的に検証したので報告する。

## 2. 回転子座標から観測したインダクタンスの変動

<2.1> 空間高調波とインダクタンスの変動 図1に本論文で検討する集中巻 IPM モータの固定子断面図を示す。集中巻固定子は同図のように巻線が 60 (deg)毎に施された形状となるため、回転角に対する磁気抵抗分布は一様にならない。巻線が施された方向には固定子鉄心の歯が存在するため磁気抵抗は相対的に小さいが、隣り合った巻線の中間では磁気抵抗が大きくなる。その結果、回転角に応じて主磁束の変動が生じ、これが空間高調波として観測される。この空間高調波はモータの構造に起因するものであり、回転子から観測したインダクタンス  $L_d$ ,  $L_q$  は回転角に対して周期的に変動する。

### <2.2> 測定結果とインダクタンス変動のモデリング

図2(a), (b)に実験により得られた  $d$  軸,  $q$  軸インダクタンスの分布を示す。この結果より集中巻 IPM モータは分布巻 IPM モータと比べ、回転角に対するインダクタンスの変動が大きく、正弦波状に変化することが確認できる。これを回転子位置の関数として定式化すると、集中巻 IPM モータの  $d$  軸ならびに  $q$  軸インダクタンスの変化は(1)のように表すことができる。

$$\begin{aligned} L_d &= l_{d0} - k_{ld} \cos 6p\theta_m \\ L_q &= l_{q0} + k_{lq} \cos 6p\theta_m \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 $l_{d0}$ ,  $l_{q0}$  は  $L_d$ ,  $L_q$  の平均値、 $k_{ld}$ ,  $k_{lq}$  はインダクタンス変動の振幅係数、 $p$  はモータの極対数である。

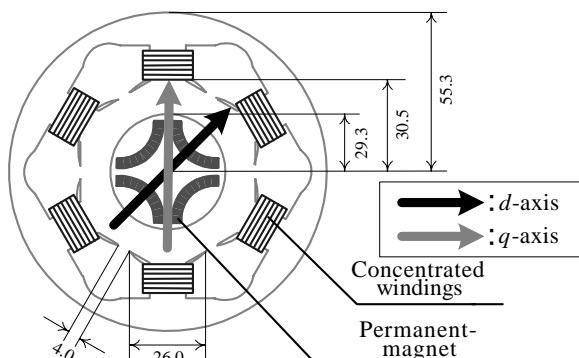
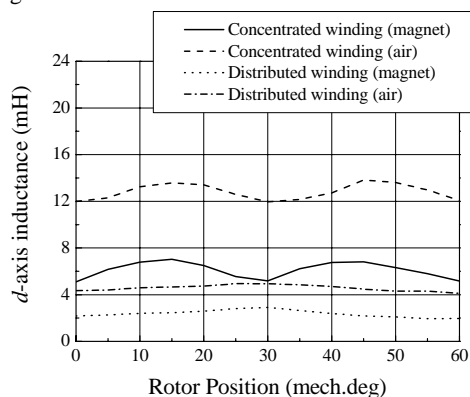
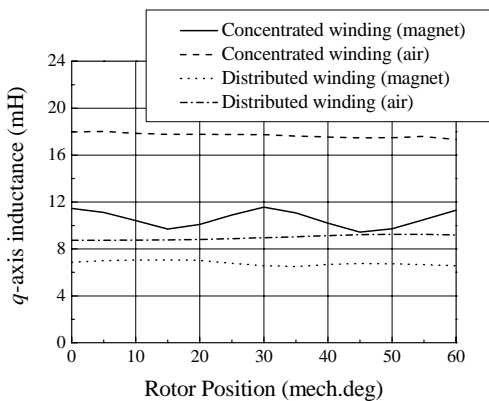


図1 集中巻 IPM モータの断面図

Fig. 1. IPM motor with concentrated stator windings.



(a) Distribution of  $d$ -axis inductance.



(b) Distribution of  $q$ -axis inductance.

図2 インダクタンス分布の測定結果

Fig. 2. Experimental results of inductance measurement.

3. 磁極位置推定法

空間高調波を含む集中巻 IPM モータに純正弦波電圧を印加してもモータ電流は正弦波にならない。それを  $d$ - $q$  座標から観測した場合は、空間高調波に起因したリップルが直流量に重畳したように観測される。逆にベクトル制御系の電流ループゲインを高くして、空間高調波に起因する電流リップルを抑制すると、操作量たる電圧指令値に同様のリップルが現れる。本論文で提案する磁極位置推定アルゴリズムは、このような電流ループの操作量に含まれる空間高調波情報を利用する。

まず、 $d$ - $q$  座標における IPM モータの一般的な回路方程式は(2)で表される。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega_m L_q \\ \omega_m L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_m \psi \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

前述のように、インダクタンス  $L_d$ 、 $L_q$  の回転子位置による変化は(1)で表されるので、これを(2)に代入すると次のように変形することができる。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + l_{d0} p & -\omega_m l_{q0} \\ \omega_m l_{d0} & R_a + l_{q0} p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_m \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 6p\omega_m k_{ld} \sin 6p\theta_m & -\omega_m k_{lq} \cos 6p\theta_m \\ -\omega_m k_{ld} \cos 6p\theta_m & -6p\omega_m k_{lq} \sin 6p\theta_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -k_{ld} \cos 6p\theta_m & 0 \\ 0 & k_{lq} \cos 6p\theta_m \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3)$$

これを推定座標上に座標変換を行い、 $\Delta\theta$  が微小 ( $\Delta\theta \approx 0$ ) であると仮定する。また、電流ループゲインは十分高く  $i_w$ ,  $i_v$ ,  $i_w$  を正弦波状に制御できるとすれば、空間高調波に起因した  $v_d$ ,  $v_q$  のリップル成分は(4)のように表される。

$$\begin{bmatrix} v_{d6f} \\ v_{q6f} \end{bmatrix} = \omega_m \begin{bmatrix} 6pk_{ld} \sin 6p\theta_m & -k_{lq} \cos 6p\theta_m \\ -k_{ld} \cos 6p\theta_m & -6pk_{lq} \sin 6p\theta_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} \dots\dots\dots(4)$$

$v_{d6f}$ ,  $v_{q6f}$  は運轉周波数の 6 倍調波の  $d$  軸,  $q$  軸電圧リップルであり、これらはバンドパスフィルタを用いて抽出することができる。(4)を  $\sin 6\theta_m$ ,  $\cos 6\theta_m$  について解くと磁極位置情報は(5)で得られる。

$$\hat{\theta}_{m6f} = \frac{1}{6p} \tan^{-1} \left( \frac{\sin 6p\theta_m}{\cos 6p\theta_m} \right) = \frac{1}{6p} \tan^{-1} \left( \frac{1}{6p} \cdot \frac{-k_{ld} \hat{i}_d v_{d6f} + k_{lq} \hat{i}_q v_{q6f}}{k_{lq} \hat{i}_q v_{d6f} + k_{ld} \hat{i}_d v_{q6f}} \right) \dots\dots\dots(5)$$

(5)では、巻線が施された歯から隣の巻線が施された歯に至る 60 (deg)区間の磁極位置しか求めることができない。このため、機械角 1 回転にあたる  $6p$  周期分の積算を行い、磁極

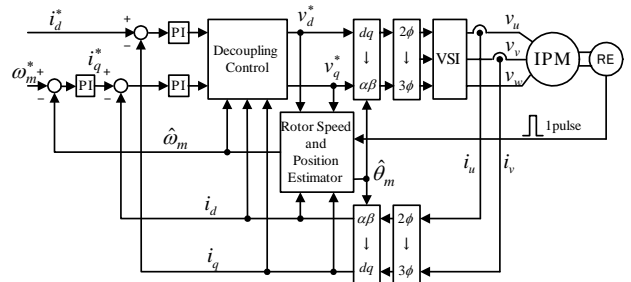


図 3 全制御システムの構成  
Fig. 3. Block diagram of whole controller.

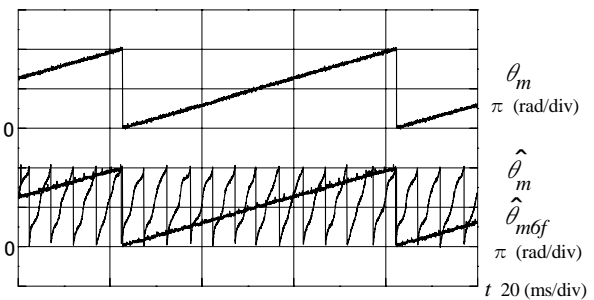


図 4 磁極位置推定の実験結果  
Fig. 4. Experimental result of position estimation.

位置推定値を求める。ただし、この手法では磁極位置の絶対的な値を知ることはできないので、1パルスエンコーダを用いるなどして磁極位置推定値  $\hat{\theta}_m$  をリセットしなければならない。

4. 実機による検証

実験システムのキャリア周波数は 20 (kHz)、DSP の演算周期は 50 ( $\mu$ s)である。また、電圧リップルは運轉速度によって周波数が変化するので、速度指令値により通過帯域の中心周波数を可変させる適応型バンドパスフィルタを採用している。

図 4 は供試機を速度指令値 1000 (r/min)でベクトル制御し、定常状態において磁極位置推定値のモニタを行ったものである。磁極位置真値に対し推定値が一致しており、良好な推定特性が得られていることがわかる。

5. まとめ

本稿では集中巻 IPM モータの回転子座標上のインダクタンスが回転角依存性をもつことに着目し、簡単なインダクタンスの数学モデルを用いた磁極位置推定法を提案した。実機検証では電流制御ループの操作量リップルを用いて良好な磁極位置推定特性を確認した。

参考文献

[1] 新開克己・野口季彦：「集中巻 IPM モータの空間高調波に着目した磁極位置センサレス制御法」電気学会産業応用部門大会, 343-346 (2004)