

# 集中巻固定子巻線を有する IPM モータの 磁極位置推定法の検討

丸山 徹\* 野口季彦 (長岡技術科学大学)

Study on Rotor Position Estimation Method of IPM Motor with Concentrated Stator Windings  
Toru Maruyama, and Toshihiko Noguchi (Nagaoka University of Technology)

1.はじめに 集中巻固定子巻線を有する内部永久磁石同期電動機 (集中巻 IPM モータ) では巻線構造に由来する空間高調波の影響を大きく受け、電圧や電流に歪みを生じる。一方、空間高調波は構造的要因から発生するため、その影響には回転子位置依存性があると考えられる<sup>[1]</sup>。本稿では集中巻 IPM モータの回転子座標からみたインダクタンスが回転子位置に応じて変動することに着目し<sup>[2]</sup>、その変動に起因する電圧リップルに基づいて磁極位置を推定する手法を検討したので報告する。

## 2. 回転子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 に本稿で検討する集中巻 IPM モータ (1500 [W], 4 [極]) の断面図を示す。同図のように固定子巻線が 60° 毎に施された特殊な形状となるため、回転方向のリラクタンス分布は一様にならない。また、集中巻では隣り合う固定子歯で磁気回路を構成するため、固定子磁束の分布に多くの空間高調波が含まれる。空間高調波はモータの構造的な要因によるものであるから、その磁気的影響は回転子位置に依存する。ここでは、集中巻 IPM モータの回転子座標からみたインダクタンスが回転子位置の関数として変動すると考える。

<2.2>測定結果と数学モデル 供試機の回転子磁極 (N 極) の方向を  $d$  軸、それと直交する方向を  $q$  軸として各軸のインダクタンス  $L_d, L_q$  を測定した。図 2 (a), (b) に実測により得られた  $L_d, L_q$  を示す。先に述べたような理由から、特に同図(a)では回転子位置によって最大 2.7 [mH]変動していることがわかる。これらを回転子位置の関数として定式化すると、(1), (2)のように表される。

$$L_d = L_{d0} \{ (1 - k_d) + k_d \cos(6p\theta_m) \} \dots\dots\dots (1)$$

$$L_q = L_{q0} \{ (1 - k_q) - k_q \cos(6p\theta_m) \} \dots\dots\dots (2)$$

ここで  $k_d, k_q$  はインダクタンスの振幅に関する係数、 $p$  は極対数である。

<2.3>計算機シミュレーションによる検証 図 3 (a) は集中巻 IPM モータに純正弦波電圧を印加し、オープンループで回転させた時の電流波形を測定したものである。また、図 3 (b) は  $L_d, L_q$  を (1), (2) のように与え、(a) と同様の条件でシミュレーションを行った電流波形である。このときの振幅係数は測定結果に基づき、それぞれ  $k_d=0.15, k_q=0.00$  とし、極対数は  $p=2$  とした。これらの波形がよく一致することから (1), (2) で表された数学モデルの妥当性を確認できる。

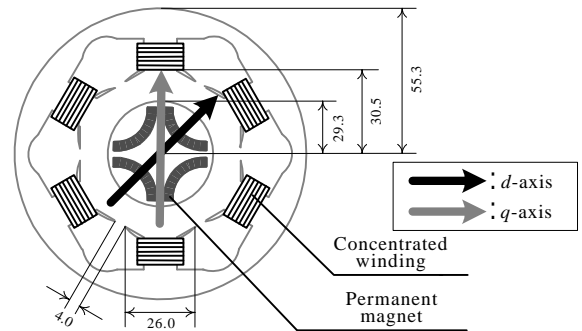
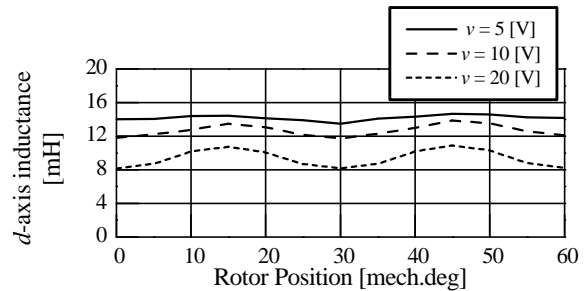
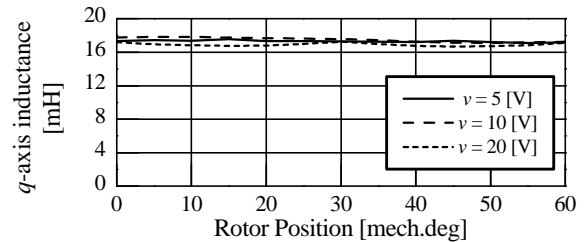


図 1 集中巻 IPM モータの断面図  
Fig. 1. IPM motor with concentrated stator windings.



(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.

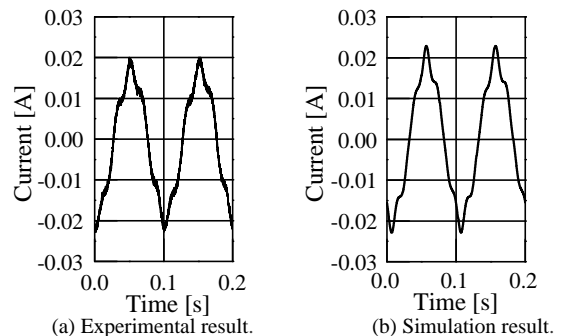


図 3 電流波形

Fig. 3. Waveforms of line current.

### 3. 磁極位置推定への応用

電流にリップルを含む集中巻 IPM モータでは回転座標変換を行っても回転子座標上の電流は直流にならない。このモータでベクトル制御を行い電流制御器のゲインを高くすると、電流の歪みは電圧指令値にリップルとして現れる。本稿では  $q$  軸に比べリップルの振幅が大きく、直流成分の変化が少ない  $d$  軸電圧指令値に発生するリップル成分に着目する。図 4 (a)は集中巻 IPM モータを電源周波数 100 [Hz]でベクトル制御により駆動したときの  $d$  軸電圧、 $d$  軸電流および  $u$  相電流の波形であり、図 4 (b)には  $d$  軸電圧指令値の FFT 解析結果を示す。同図より回転子座標上の  $d$  軸電圧リップルが電源周波数の 6 倍（機械周波数に対しては  $6p$  倍）で現れることがわかる。

図 5 は  $d$  軸電圧リップルと磁極位置真値（正の  $d$  軸方向）の位相特性について計算機シミュレーションと実機により調べた結果である。いずれの場合も速度に依存した定常的な位相差が同様な曲線で発生している。しかし、シミュレーションでは負荷率に対してまったく依存性はないが、実機では負荷率によって数度程度の変動が現れる。

図 6 に磁極位置推定システムの一構成例を示す。電源周波数の 6 倍調波である  $d$  軸電圧リップル  $v_{dh}$  をバンドパスフィルタで抽出した後、PLL の基準信号として位相をロックさせる。このため 1 周期の位相分解能を向上させることが可能である。PLL から出力される速度情報を機械角 1 回転にあたる  $6p$  周期分積算し  $\hat{q}_m$  を求める。ただし、磁極位置真値の絶対的な位相を知ることができないので、1 パルスエンコーダを用いるなどして磁極位置推定値  $\hat{q}_m$  をリセットしなければならない。本手法では速度情報を積算し外部信号によりリセットするため、図 5 に示すような位相特性の影響を考慮する必要はない。

### 4. 実機による検証

図 6 のシステム構成に基づいた磁極位置推定器を含むベクトル制御系をすべて DSP によるデジタル回路で構成した。実験システムのインバータ直流バス電圧は 280 [V]、キャリア変調周波数は 16 [kHz] であり、DSP の演算周期は 62.5 [ms] である。また、 $d$  軸電圧リップルは運転速度によって周波数が変化するため、バンドパスフィルタは速度指令値により通過帯域中心周波数を可変させる適応型の構成となっている。

図 7 は供試機を電源周波数 100 [Hz]の速度指令値でベクトル制御し、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位置の関数として変動することに着目し、それに起因する電圧指令値のリップルを利用して磁極位置推定へ応用する手法を提案した。実機検証では  $d$  軸電圧リップルを用いて良好な磁極位置推定特性を確認することができた。

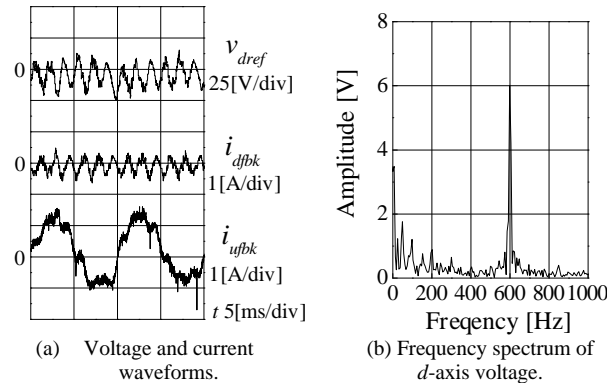


図 4 電圧、電流リップル波形と  $d$  軸電圧指令値の周波数スペクトル  
Fig. 4. Voltage, current ripple waveforms and  $d$ -axis voltage reference frequency spectra.

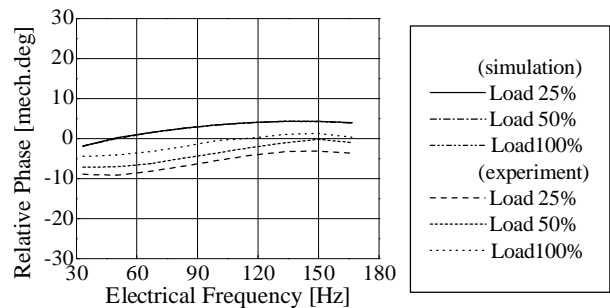


図 5 磁極位置真値と  $d$  軸電圧リップルの位相差  
Fig. 5. Relative phase displacement between rotor position and  $d$ -axis voltage ripple.

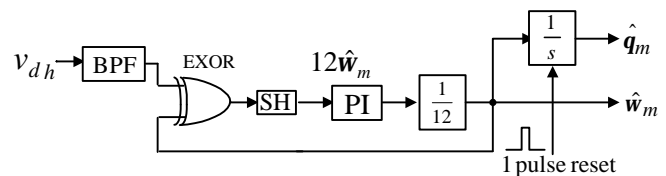


図 6 磁極位置推定システムの構成例  
Fig. 6. Schematic diagram of rotor position estimator.

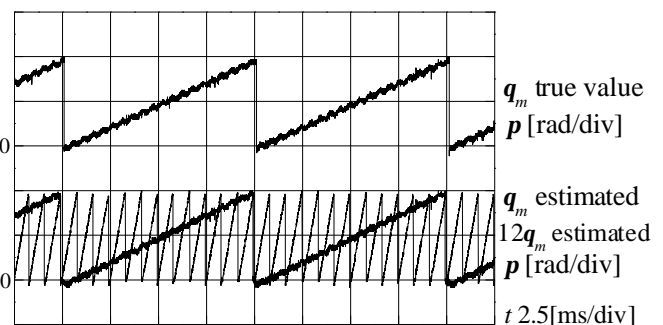


図 7 磁極位置推定の実験結果  
Fig. 7. Experimental result of position estimation.

### 参考文献

- [1] 丸山, 野口: 「永久磁石モータの空間高調波に着目した磁極位置推定法の検討」, 電気学会産業応用部門大会, 419-420 (平 14)
- [2] 丸山, 野口: 「集中巻固定子巻線を有する IPM モータのインダクタンス分布」, 電気学会東京支部新潟支所大会, 133 (平 14)