

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

丸山 徹, 野口季彦 (長岡技術科学大学)

A Study on Rotor Position Estimation Method of Permanent-Magnet Motor Using Spatial Harmonics
Toru Maruyama, Toshihiko Noguchi (Nagaoka University of Technology)

Abstract - This paper describes a spatial-harmonics based estimation method of rotor position of a permanent magnet motor with concentrated stator windings. The method utilizes current ripples caused by variations of inductance to estimate relative rotor position. Since the inductance periodically pulsates with the rotor position depending on a particular stator-core structure, it is inferred that the relative phase of the current ripples indicates the rotor position. In this paper, possibility of the spatial-harmonics based method is discussed by conducting several computer simulations on the assumption of the inductance variations.

キーワード：永久磁石モータ, 集中巻線, 空間高調波, 磁極位置推定

1. はじめに

近年, エアコンのコンプレッサ用として固定子に集中巻線を有する永久磁石モータが採用されている。これは巻線構造が非常に簡単であり, 容易に量産化や低コスト化を図ることができるためである。しかし, 集中巻を施すために固定子鉄心が特殊な形状となり, 回転方向のリラクタンس分布が一様ではなくなる。その結果, 正弦波電圧を印加しても回転角に応じて駆動電流にリラクタンس分布の不均一性を反映したリプルが現われる。

本稿ではこのような固定子集中巻線を有する永久磁石モータの電流リプルと回転角の関係に着目し, 磁極位置推定を行なう手法について検討した。ここでは回転子座標から見たインダクタンスが回転角に応じて変動すると仮定し, その変動により生じる電流リプルを用いて磁極位置を推定する手法について報告する。

2. 空間高調波とインダクタンス変動

<2.1>リラクタンس分布の不均一性 図1に本稿で検討する永久磁石モータの固定子断面図を示す。同図のように固定子巻線は 60° 毎に局部的に巻かれており, 回転方向のリラクタンスは一様にならない。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リラクタンスは相対的に小さいが, 隣り合った巻線間方向ではリラクタン스가大きい。そのため, 回転子座標から見たインダクタンスは一定にならず, 回転角の関数として変動すると考えられる。ここでは, 回転子磁極の方向を 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が次式のように変動すると仮定した。

$$L_d = L_{d0} \frac{1}{1 - k \cos 6\theta_m} \quad (1)$$

$$L_q = L_{q0} \frac{1}{1 + k \cos 6\theta_m} \quad (2)$$

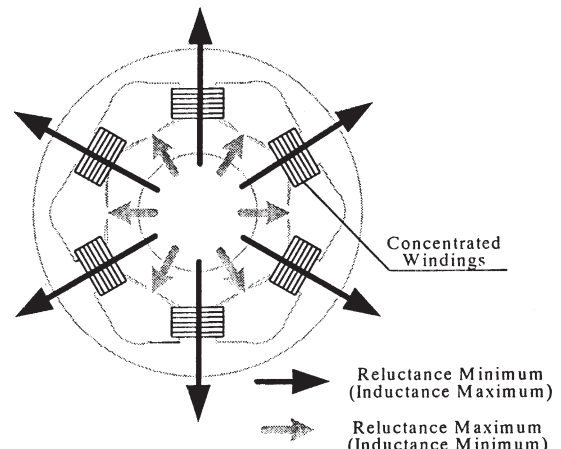
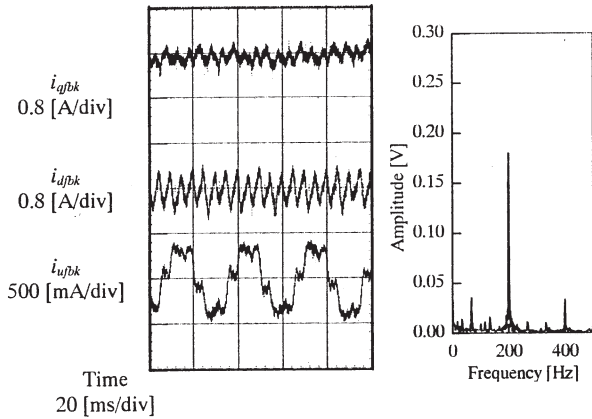


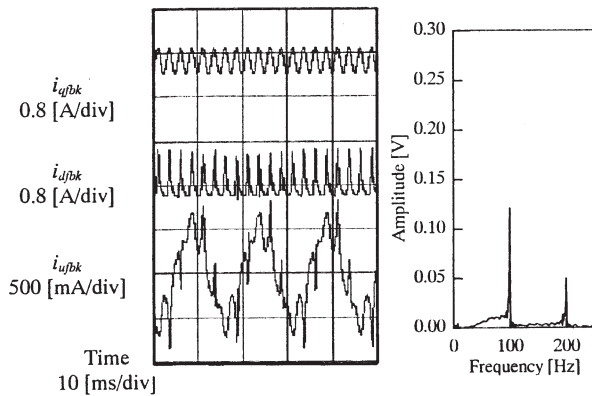
図1 集中巻固定子巻線をもつPMモータのリラクタンس分布
Fig.1. Reluctance distribution of PM motor with concentrated stator windings.

ここで, $L_{d0}/(1-k)$ および $L_{q0}/(1+k)$ は各軸が巻線の方向を向いたときの d 軸, q 軸インダクタンスの最大値である。また, k はリラクタンスの変動幅に相当する定数である。

<2.2>リラクタンスの変動幅 (1) および (2) 中の定数 k を決定するため, 供試モータで実験的にベクトル制御を行ない電流リプルを観測した。図2(a)は実験結果であり, 図2(b)は(1)および(2)を考慮して計算機シミュレーションを行なった結果である。実験結果では回転角に同期したリプルが線電流に見られ, これらを d - q 座標上に変換した i_d, i_q は運転周波数の6倍のリプルを含む。シミュレーションでは実験結果とほぼ等しくなるように定数 k を0.5と与えた。突出したスペクトルが現われる周波数は両者で異なるが, 実験は4極のモータ, シミュレーションは2極のモータを用いて同一の機械角速度で運転したためである。



(a) 実験波形



(b) シミュレーションによる波形

図2 電流リップル波形とd軸電流の周波数スペクトル
Fig. 2. Current ripple waveforms and d-axis current frequency spectra.

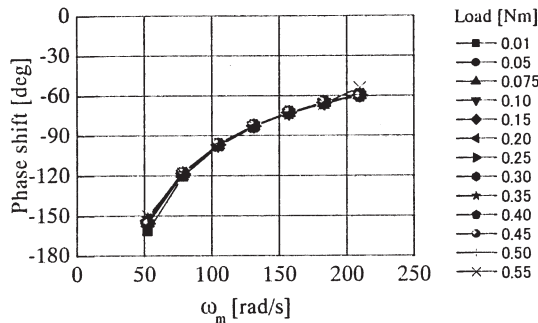


図3 磁極位置真値とd軸電流リップルの定常位相差
Fig. 3. Relative phase displacement between rotor position and d-axis current ripple.

3. 磁極位置推定アルゴリズム

d 軸電流は負荷や速度の急激な変化の影響を受けにくいため、磁極位置推定には d 軸の電流リップルを用いる。図3は磁極位置真値（正の d 軸方向）と d 軸電流リップルの位相を調べたものである。これらの間には速度に依存した定常的な位相差 $\Delta\theta_{st}$ が発生するが、負荷率には影響を受けない。したがって、d 軸電流リップルの位相がわかれば推定速度に応じた図3の定常位相差を補償することで磁極位置情報を得ることができる。ただし、磁極位置真値の絶対的な位相は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

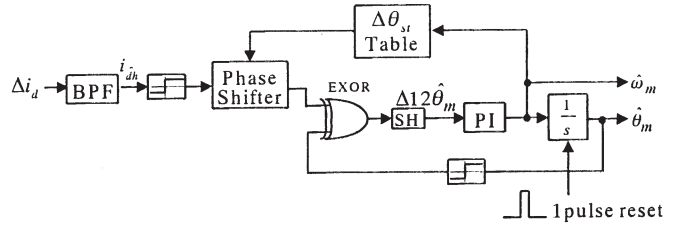


図4 磁極位置推定アルゴリズム
Fig. 4. Estimation algorithm of rotor position.

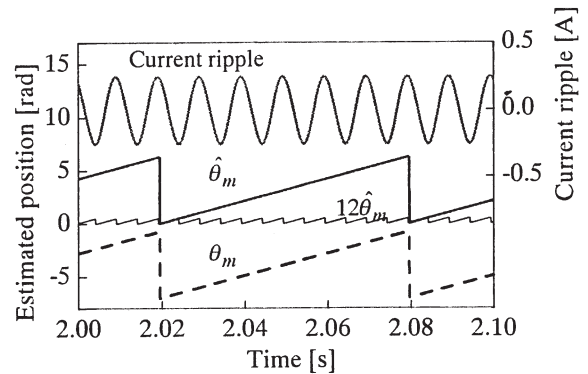


図5 位置推定のシミュレーション結果
Fig. 5. Simulation result of position estimation.

置推定値 $\hat{\theta}_m$ をリセットしなければならない。

図4に磁極位置推定アルゴリズムの構成を示す。d 軸電流リップルは BPF で抽出した後パルス化し、速度に応じて定常位相差 $\Delta\theta_{st}$ だけ移相する。さらに PLL を用いて6倍周波数成分に対して位相をロックし、その1周期の位相分解能を向上させる。また、エンコーダからの1パルスを基準として PLL 出力の6周期分を積算することにより $\hat{\theta}_m$ を求める。

4. 計算機シミュレーションによる検証

磁極位置推定アルゴリズムに基づいてシミュレーションを行なった。図5は負荷 0.075 [Nm]、速度 105 [rad/s]一定で運転したときの BPF から抽出された d 軸電流リップルおよび定常状態における磁極位置推定結果である。d 軸電流リップルが磁極位置真値に対しおよそ 100 [deg]進んでいるが、これを図3の多項式近似曲線から得られる量だけ移相すれば定常的な位相差 $\Delta\theta_{st}$ は補償できる。6倍周波数成分を正負で分割した12個の鋸歯状波 $12\hat{\theta}_m$ は PLL から得られるが、それを積算して得られた磁極推定位置 $\hat{\theta}_m$ と磁極位置真値 θ_m が重なっており、良好な推定が行なわれていることがわかる。

5. まとめ

本稿では空間高調波をインダクタンス変動と捉え、その影響による d 軸電流リップルを用いて磁極位置推定を行なう手法を検討した。計算機シミュレーションにより定速運転、定負荷状態で良好に磁極位置推定が可能であることを確認した。

参考文献

武田, 松井, 森本, 本田: 「埋込磁石同期モータの設計と制御」オーム社 (2001年)