

ハルバッハ配列界磁同期電動機の d 軸電流キャンセラーの検討

Examining of d-axis current canceller for Halbach array field synchronous motor

浅野 颯太¹⁾

指導教員: 森下 明平¹⁾

1) 工学院大学 工学部 電気電子工学科 電磁力応用システム研究室

キーワード: ハルバッハ配列, SPMSM, d 軸電流キャンセラー

1. はじめに

近年, ドローンは産業のみならず人命救助等にも応用され, 緊急事態時における稼働時間を向上させるためには, 電力効率の向上が必至である。この問題に対し我々は, 制御が容易なハルバッハ配列界磁型同期電動機を用いて解決を試みている^[1]。この電動機では d 軸電流 i_d はトルク発生に寄与しないため, 先行研究では制御方式として $I_d=0$ 制御を用いていた。しかし, 実際にはサンプリング遅れが原因とみられる d 軸電流が流れ, 効率の悪化が懸念される。そこで, 本研究ではドローン用ハルバッハ配列界磁型同期電動機に用いる d 軸電流キャンセラーを検討する。

2. ハルバッハ配列界磁同期電動機

ハルバッハ配列とは, 永久磁石の磁化方向を所定の角度で回転させて並べたものである。配列の片面に磁束が集中し, 発生する磁束は正弦波状である。この配列と並行に電磁鋼板を設ければ, 鏡像法によりあたかも 2 列にハルバッハ配列が並んでいるようになりギャップでの磁束をさらに強くすることができる。これによりハルバッハ配列界磁同期電動機では, コアレスモータとする事ができコギングが無いいためトルクリプルが小さく, 小型かつ高出力で, 高調波が少ないため高速回転が可能になる。

3. 座標変換

制御の容易性から座標変換を行うのが一般的である。三相座標系から回転座標系に変換する変換行列 ^{$^{dq}C_{uvw}$ [2], [3]}は(1)式ようになる。これを用い

た変換を d - q 変換と呼ぶ。

$$^{dq}C_{uvw} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad \dots(1)$$

但し, ω : 角速度, t : 時間。

(1)式を用いて, 三相電流 i_{uvw} を d - q 変換を行うと(2)式のように変換する。

$$i_{dq} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = ^{dq}C_{uvw} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad \dots(2)$$

但し, i_d : d 軸電流, i_q : q 軸電流, i_u : U 相電流, i_v : V 相電流, i_w : W 相電流。

4. $I_d = 0$ 制御

PMSM のトルク T を(3)式に示す。

$$T = P_n(L_d - L_q)i_d i_q + P_n\psi_a i_q \quad \dots(3)$$

但し, P_n : 極対数, ψ_a : 電機子鎖交磁束,

L_d : d 軸インダクタンス, L_q : q 軸インダクタンス。

一般に i_d の項をリラクタンストルク、 i_q の項をマグネットトルクと呼ぶ。ハルバッハ配列界磁同期電動機は SPMSM で非突極であるため $L_d = L_q$ である。従ってリラクタンストルクはゼロであり、 i_d はトルク発生に寄与しないので i_d の目標値を 0 とし最小電流で駆動させる。これを $I_d = 0$ 制御と呼ぶ。この $I_d = 0$ 制御は制御システムに組み込み済みである。

しかし, 実際には $i_d = 0$ とはならない。サンプリング周期 T_s を 30 [μ s], 20 [μ s], 10 [μ s]とした時のシミュレーションにおいて d 軸電流の波形を図 1 に示す。

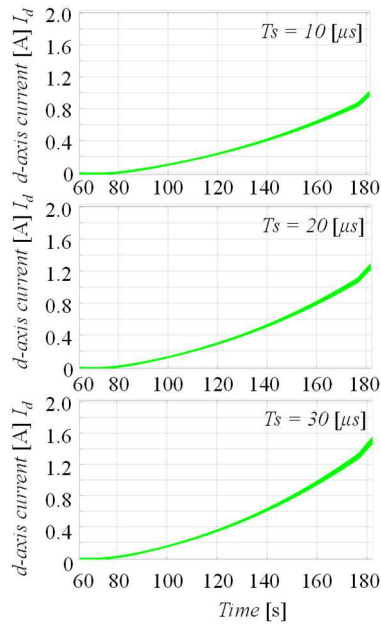


図1 d 軸電流のシミュレーション結果

このシミュレーションは無負荷状態で、起動から 50[秒]まで V/f 一定制御で同期引き込みを行い、定格の 7500[rpm]までベクトル制御で駆動させる。サンプリング周期を短くすると d 軸電流が小さくなっている事が分かる。このことから、サンプリング遅れにより i_d が流れているのではないかと考える。

5. d 軸電流キャンセラーの検討

前章で述べた通り、サンプリング遅れが原因であると考えられるので解決策としてサンプリング周波数を上げることが挙げられるが、制御器の性能上サンプリング周期を現状の 30[μs]より短くすることは現実的でない。そこで、制御で i_d を 0 に収束させる事を考える。

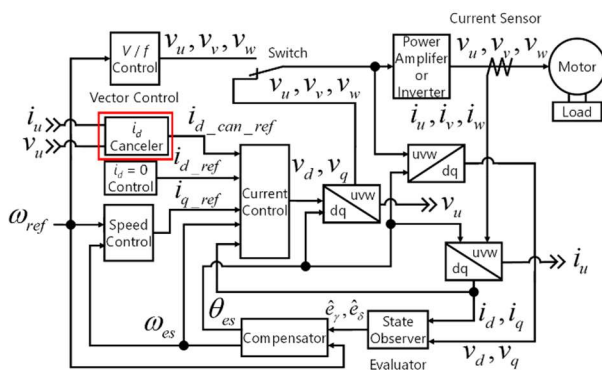


図 2 制御ブロック線図

図 2 に制御ブロック図を示す。赤枠線部分は

今回新たに組み込んだ d 軸電流キャンセラーのブロックである。検討した d 軸電流キャンセラーは、U 相電圧のゼロクロスを参照しその時の U 相電流を検出する。この時、検出した電流が正なら電流は電圧に対して進み位相であり、負なら遅れ位相である。また、検出した U 相電流の値を、U 相電流の実効値で割り積分器を介して i_d の指令値とする。これを電流制御器に入力し、実際の i_d との偏差を取り積分したものから電圧指令値を生成する。

6. シミュレーション

MATLAB/Simulink®を用い、前章で示した制御ブロックのシミュレーションを行った。シミュレーションにおける i_d の波形を図 3 に示す。

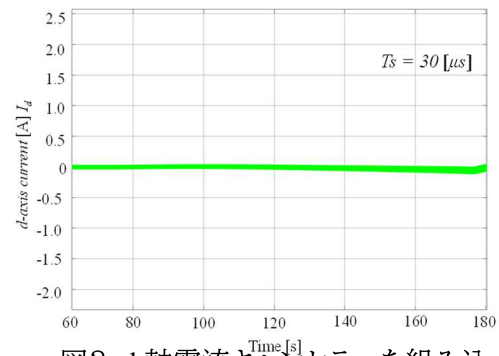


図3 d 軸電流キャンセラーを組み込んだシミュレーション結果

今回検討した d 軸電流キャンセラーを組み込む前と比較して、 i_d が 0 に追従している事が確認できた。

7. おわりに

d 軸電流キャンセラーの検討を行い、シミュレーションにおいて i_d が 0 に追従することが確認できた。今回は無負荷においてシミュレーションを行ったが、今後は負荷をかけた場合でのシミュレーションと実機試験を行う予定である。

参考文献

- [1] 小見将史, 森下明平:「ハルパツハ配列界磁型ドローン用モータの高効率駆動の検討」, 電気学会研究会資料, LD-21-014, TER-21-014 (2020)
- [2] 電気学会・センサレスベクトル制御の整理に関する調査専門委員会:「AC ドライブシステムのセンサレスベクトル制御」, オーム社, pp124-152 (2018)
- [3] 武田洋次, 松井信行, 森本茂雄, 本田幸夫:「埋込磁石同期モータの設計と制御」, オーム社, pp1-36, pp107-128 (2013)