

磁気変調形モータのベクトル制御と動力分配の実機検証

本橋 勇人*, 野口 季彦 (静岡大学), 青山 真大 (スズキ)

Experimental Verification of Vector Control and Power Split of Magnetic-Modulated Motor

Yuto Motohashi*, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University), Masahiro Aoyama (SUZUKI Motor Corporation)

1. はじめに

磁気変調形モータは HEV システムの集積化に向けて研究されている 2 つの回転部をもつ特殊な構造のモータである。このモータは磁気的な変調子を有するため、磁石磁束が変調されてステータコイルに鎖交する。従って、PM ロータの磁極位置に基づく dq 座標では直接磁気変調形モータを制御することはできない。筆者らは、 dq 座標に代わる新たな回転座標系として $\gamma\delta$ 座標を定義することで磁気変調形モータのベクトル制御を検討してきた。また、インバータからの入力電力と PM ロータへの機械入力を同期周波数の関係に従って任意に分配し、変調子より機械出力が得られることを実験的に確認したので報告する。

2. 動作原理と $\gamma\delta$ 座標におけるベクトル制御

〈2-1〉 空間的な磁束分布と磁気変調原理 図 1 に試作機の構造を示す。磁気変調形モータはステータと PM ロータの極数が異なり、一般的に $P_s = P_{mod} - P_{pm}$ の関係が成立する。試作機はステータ 4 極対、PM ロータ 8 極対、変調子 12 コアである。図 2(a) に磁気変調形モータをステータ電気角 1 周期分について直線状に展開した模式図を示す。PM ロータの磁石起磁力 $F_{pm}(\theta, t)$ 、変調子のパーミアンス $P(\theta, t)$ が正弦波状に分布すると仮定すると、それぞれ次式で表すことができる。

$$F_{pm}(\theta, t) = f_{ac} \cos\{8(\theta - \theta_{pm})\}$$

$$P(\theta, t) = P_{dc} + P_{ac} \cos\{12(\theta - \theta_{mod})\} \quad (1)$$

なお、式中の f_{ac} は磁石起磁力の振幅、 P_{dc} は変調子パーミアンスの直流分、 P_{ac} は変動分を表している。また θ_{pm} 、 θ_{mod} はそれぞれ、PM ロータの磁極、変調子コアの機械角における位置である。

ステータと変調子間のギャップに作られる磁束分布は $F_{pm}(\theta, t)$ と $P(\theta, t)$ の積となるが、4 極対のステータにおける回転磁界と同期する成分 $\phi_{syn}(\theta, t)$ のみを抜き出すと次式を得る。

$$\phi_{syn}(\theta, t) = \frac{1}{2} f_{ac} \lambda_{ac} \cos\left\{4\left(\theta - \frac{12\theta_{mod} - 8\theta_{pm}}{12 - 8}\right)\right\} \quad (2)$$

(2) より磁石磁束が変調されることで、回転磁界の極数と回転周波数が PM ロータのそれらと異なるため、 dq 座標上でベクトル制御を行うことは困難である。

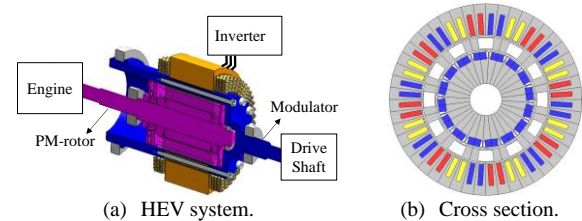


図 1 磁気変調形モータの構造
Fig. 1. Configuration of magnetic-modulated motor.

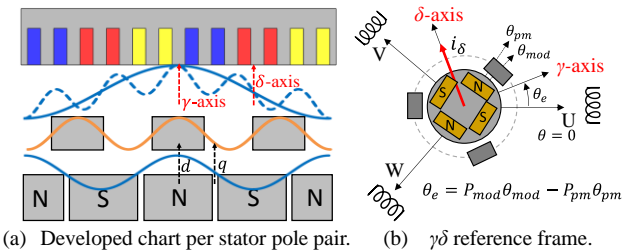


図 2 $\gamma\delta$ 回転座標の定義
Fig. 2. Definition of rotating $\gamma\delta$ reference frame.

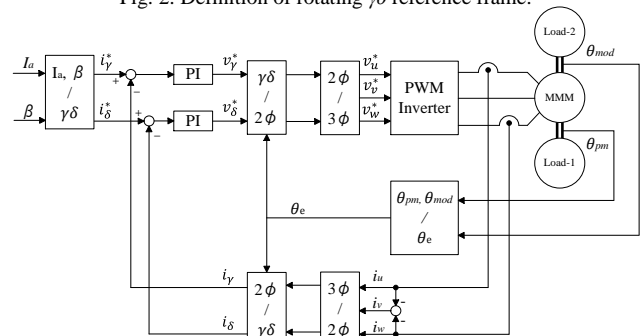


図 3 ベクトル制御ブロック図
Fig. 3. Vector control block diagram.

〈2-2〉 $\gamma\delta$ 座標上におけるベクトル制御 磁気変調形モータのベクトル制御を行うため、新たに $\gamma\delta$ 座標を定義する。(2)において、機械角 $\theta = 3\theta_{mod} - 2\theta_{pm}$ の位置で $\phi_{syn}(\theta, t)$ が最大になることがわかる。この位置を一般的な PM モータの d 軸に相当する位置として γ 軸と新たに定義する。また、 γ 軸から電氣的に位相が $\pi/2$ 進んだ位置を δ 軸と定義する。これは一般的な PM モータの q 軸に相当する。三相交流電流の回転座標変換を行うため、4 極対のステータに対応する電気角 $\theta = 12\theta_{mod} - 8\theta_{pm}$ で回転座標変換 ($\gamma\delta$ 変換) を行う。この式をそれぞれの機械角速度で書き直すと、 $\omega = 12\omega_{mod} - 8\omega_{pm}$ となり、これを同期角周波数の関係と呼ぶ。なお、 ω は電流の電気角周波数である。

文献(1)の電圧方程式より、磁気変調形モータのパワーフローは (3)のように表される。左辺は変調子の機械出力、右辺第 1 項は入力電力、第 2 項は PM ロータの機械入力、第 3 項は銅損を表している。

$$\omega_{mod}\tau_{mod} = (v_{\gamma}i_{\gamma} + v_{\delta}i_{\delta}) + (-\omega_{pm}\tau_{pm}) - R(i_{\gamma}^2 + i_{\delta}^2)$$

$$\therefore \tau_{pm} = -P_{pm}\psi_a i_{\delta}, \quad \tau_{mod} = P_{mod}\psi_a i_{\delta}, \quad (3)$$

3. 原理検証機と実験システム

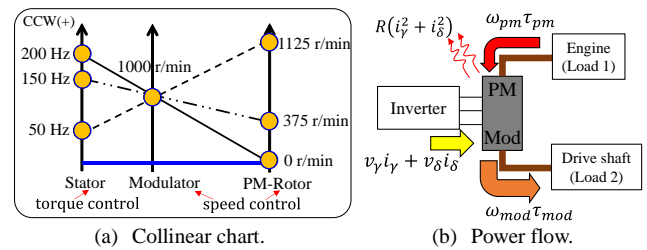
図 3 に制御ブロック図を示す。磁気変調形モータは 2 つの回転部を有するため負荷モータ、レゾルバがそれぞれ 2 組必要となる。三相交流電流に対して前述の位置情報をもとに $\gamma\delta$ 変換を行い、電流ベクトルの振幅 I_a 、電流位相 β の指令値を与えることでトルクを制御する。2 つの負荷モータはそれぞれ変調子と PM ロータにトルクピックアップを介して直結されており、独立に速度制御されている。なお、試作機は原理検証を目的としたステータ外形 120 mm、積圧 49.5 mm のダウンサイズモデルである。

図 4(a)に磁気変調形モータの駆動条件を説明する速度共線図を示す。本稿では、同一の変調子出力を得るときに輸入された動力の分配が可能であることを検証する。図 4(b)にパワーフローを示す。PM ロータに接続されている負荷モータをエンジン、変調子に接続されている負荷モータを駆動輪の負荷と想定している。

4. 実験結果

図 5 に各運転モードでの電流—トルク特性のグラフを示す。 $i_{\gamma} = 0$ として、 i_{δ} は 70 A まで 10 A ごとに変化させる。実験結果からトルクは i_{δ} に比例し、異なる運転モードでも i_{δ} が同じであれば各要素の発生トルクも同じになることが確認できる。

図 6 に同一の変調子出力を得るときのパワーの内訳を示す。全ての運転モードで電流指令は $i_{\gamma} = 0$ A, $i_{\delta} = 70$ A とした。電流周波数 50 Hz 駆動時は PM ロータの回転数が高いため、変調子出力のうちインバータからの入力電力を PM ロータの機械入力为上回る。また、電流周波数 200 Hz 駆動時は PM ロータは 0 r/min であるので機械的な入力はなく、インバータからの電力のみが変調子出力となる。なお、図中の PM ロータへの機械入力はトルク実測値と回転数の積から求め、機械出力となる正味の入力電力は変調子機械出力実測値と PM 機械入力の差から求めた。銅損は直流電位降下法により求めたモータの巻線抵抗 R から算出した値であり、 $R = 15.76$ m Ω である。その他損失はモータ出力端子部に接続したパワーメータの入力電力実測値から正味の入力電力と銅損の和を差し引いて算出した。また、トルクの測定は 1 point / 0.5 s でサンプリングし、15s 間の単純平均を使用している。図 7 に電流周波数 50 Hz 駆動時の三相交流電流波形と $\gamma\delta$ 軸電流波形を示す。電流リップルが観測されるが、 $\gamma\delta$ 座標上で電流制御が実現していることが確認できる。



(a) Collinear chart.

(b) Power flow.

図 4 速度共線図とパワーフロー

Fig. 4. Collinear chart and power flow.

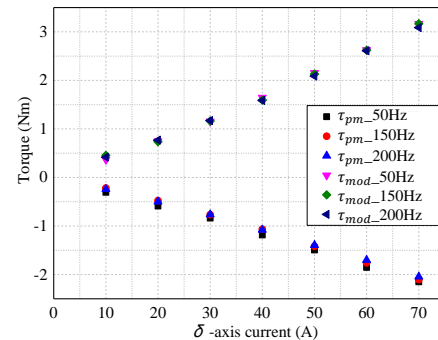


図 5 トルク—電流特性

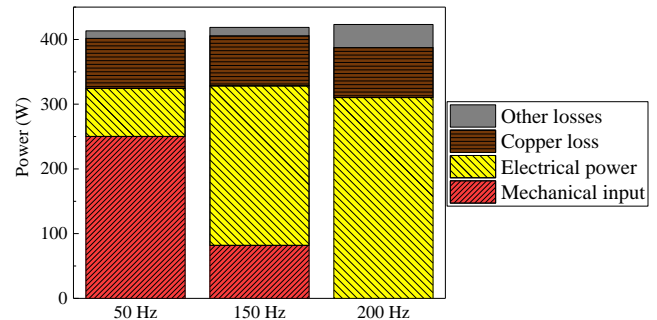
Fig. 5. Torque— δ -axis current characteristic.

図 6 入力動力の内訳

Fig. 6. Classification of input power.

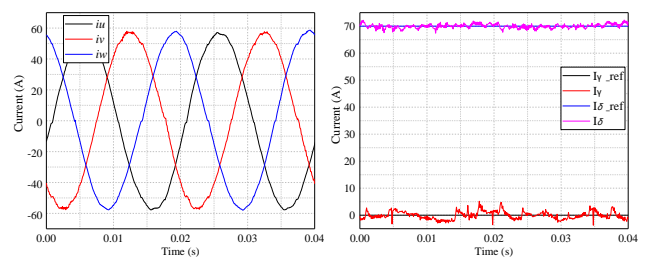


図 7 電流波形

Fig. 7. Current waveforms.

5. まとめ

2 つの回転部をもつ磁気変調形モータに対して、 dq 回転座標に代わる新たな回転座標系として $\gamma\delta$ 座標系を定義することでベクトル制御を可能とした。また、同一の変調子出力を得る場合にインバータからの電力と PM ロータの機械入力を分配可能であることを実証した。

文献

- (1) 本橋・野口・青山：「磁気変調形モータのベクトル制御と実機検証」電学研会 MAG-16-158, MD-16-098, LD-16-112 (2016)