

# 鎖交磁束に着目した集中巻永久磁石同期モータの 6次ラジアル力とトルクリプルの同時制御の提案

～無負荷での検証～

兼松正人\*，宮島孝幸，藤本博志，堀洋一（東京大学），  
榎本俊夫，金堂雅彦，小宮洋志，  
吉本貫太郎，宮川隆行（日産自動車）

Proposal of Simultaneous Suppression Control of 6th Radial Force and 6th Torque Ripple for IPMSM Based on Flux Linkage – Verification on No-Load Condition –

Masato Kanematsu\*, Takayuki Miyajima, Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori (The University of Tokyo)  
Toshio Enomoto, Masahiko Kondou, Hiroshi Komiya,  
Kantaro Yoshimoto, Takayuki Miyakawa (Nissan Motor Co., LTD.)

## Abstract

IPMSMs (Interior Permanent Magnet Synchronous Motors) are widely used for many industrial applications. However, IPMSMs cause large noise and vibration due to torque ripple and radial force. In this paper, simultaneous suppression control of 6th order radial force and 6th order torque ripple is proposed. Firstly, simple modelling of 6th radial force is proposed based on flux-linkage. From this simple modelling, d-axis harmonic current which can suppress 6th order radial force is derived. Secondly, the analysis of the proposed simple 6th radial force model shows that d-axis current can suppress 6th radial force and q-axis current do not cause 6th radial force on no-load condition. Finally, simulations and experiments on no-load condition are performed to show the verification of simultaneous suppression control of 6th order radial force and 6th order torque ripple.

キーワード：埋込磁石同期モータ，鎖交磁束，ラジアル力，トルクリプル抑制制御，ラジアル力抑制制御，振動抑制 (IPMSM, flux linkage, radial force, torque ripple suppression control, radial force suppression control, vibration suppression)

## 1. 序 論

現代社会において，モータの果たす役割は非常に大きく，その中の代表的なモータとして，埋込磁石同期モータ (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor: IPMSM) がある。IPMSM は，エアコンのコンプレッサや掃除機，電気自動車など身近な場面で使われており，IPMSM が持つトルクリプルや半径方向電磁加振力 (Radial Electromagnetic Force: ラジアル力) による音振動が問題となっている。そこで IPMSM の低振動・静音化手法が強く求められている。

電磁加振力による振動の解析技術は盛んに研究されている<sup>(1)</sup>。解析技術の発達とともに，ラジアル力を抑制する設計法が先行研究により提案されている<sup>(2) (3) (4) (5)</sup>。しかし，構造的アプローチは設計，製造コスト増加の問題がある。そこで筆者らは制御によるラジアル力抑制手法に注目している。先行研究としては，屋代らの研究<sup>(6)</sup> などがあるが，特定駆動条件において多項式近似を用いて電流とラジアル力の関係をモデル化しているため，駆動条件が変わると適用できないなどの問題がある。PWM キャリアに起因する振動の抑制制御手法として，文献<sup>(7)</sup> がある。フーリエ級数

展開を用いてラジアル力分布を直接記述するという試み<sup>(8)</sup> もあるが，モデル化が非常に複雑となり，制御に用いることの出来るラジアル力の簡易モデルが構築されているとは言いがたい。また，海外にて SR モータではトルクリプルとラジアル力の同時制御が提案されている例は存在する<sup>(9)</sup> がこの点に着目している先行研究は非常に少ない。

IPMSM では，時間次数として電気角 2 次と電気角 6 次のラジアル力が音振動に寄与する加振力になりやすいことが知られている<sup>(10)</sup>。そこで著者らは，ラジアル力の主成分である電気角 2 次ラジアル力のモデル化及びその制御方法について提案してきた<sup>(11) (12)</sup>。一方，電気角 6 次ラジアル力は大きさとしては小さいが，空間として円環 0 次のモードを持つ電磁加振力であり，このラジアル力がステータの 0 次固有モードを励起する際に非常に大きな音振動が発生する。そのため，駆動時に特に問題となりやすく，電気角 6 次ラジアル力のモデル化及び低減方法の確立は非常に重要な問題である。図 1 に 2 次，6 次ラジアル力の概念図とラジアル力が励起する代表的なステータの固有モードを示す。

先行研究では，ラジアル力分布の時間及び空間の高調波

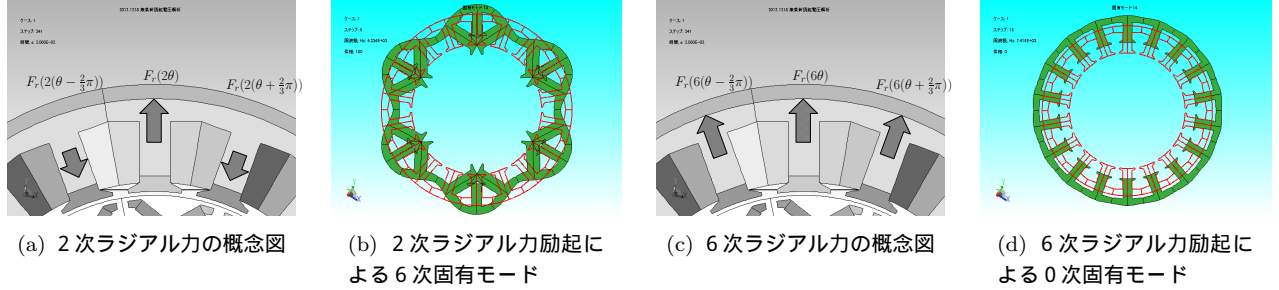


図 1 ラジアル力とステータ固有モードの関係 (12S18P 集中巻の場合)

Fig. 1. relationship between radial force and natural frequency (12S18P concentrated winding)

成分と振動応答の相関に注目している例が多い<sup>(5)</sup>が、本稿で考察している比較的スロット数の少ない集中巻モータの場合、1 ティース全体に働くラジアル力の時間高調波成分がステータの振動になると著者らは考えている。この前提に基づき、1 ティース全体に働く電気角 6 次成分のラジアル力近似モデルを鎖交磁束に着目して導出する。近似モデルに基づき、6 次ラジアル力を低減する電流指令値を導出する。次に今まで考慮されていなかった 6 次トルクリプル抑制制御と 6 次ラジアル力の関係を q 軸基本波電流  $i_{q0} = 0$  の条件にて考察する。最後に無負荷状態における 6 次ラジアルとトルクリプルの同時抑制制御を提案し、電磁界解析結果及び実験において近似モデルの妥当性を検証する。

## 2. 本稿で用いる仮定

本節では、本稿で用いる仮定を示し、仮定に基づき電気角 6 次ラジアル力近似モデルを導出する。本稿では、理論検証のために JSOL 社製 JMAG の 2 次元磁場解析を用いている。理想電流源を用い、一定回転の条件で解析している。

2.1 電流、鎖交磁束、ラジアル力の関係について U 相 1 ティースを貫く磁束  $\phi_u(t)$  は式 (1) である。

$$\phi_u(t) = \frac{\psi_u(t)}{PN} \quad (1)$$

ここで、 $P$ : 極対数、 $N$ : 1 ティース当たりのターン数、 $\psi_u$ : U 相全鎖交磁束である。ここで、U 相ティース表面 (空隙方向) に分布する周方向、半径方向磁束分布  $B_\theta(t)$ 、 $B_r(t)$  を考え、鎖交磁束が全て半径方向方向磁束分布  $B_r(t)$  になると仮定すると、式 (2) となる。

$$\phi_u(t) = \int B_r(t) dS \quad (2)$$

ここでマクスウェル応力により、U 相ティースに働くラジアル力  $F_u$  は式 (3) となる。

$$F_u(t) = \int \frac{B_r(t)^2}{2\mu_0} dS \quad (3)$$

ただしティース表面  $S$  は、空隙に面する面積のみを考えている。ここで磁束がティース表面  $S$  に均等に分布するという仮定を用いる。この仮定により、式 (2)、(3) はそれぞれ式 (4)、(5) となる。

$$\phi_u(t) = B_r(t)S \quad (4)$$

$$F_u(t) = \frac{B_r^2(t)}{2\mu_0} S \quad (5)$$

本稿では、常に一定速で回転している状態を仮定しているため、今後時間の関数として扱わず、電気角  $\theta$  の関数として扱う。この点に注意して、式 (4)、(5) をまとめると、式 (6) となる。

$$F_u(\theta) = \frac{\psi_u^2(\theta)}{2\mu_0 SP^2 N^2} = A\psi_u^2(\theta) \quad (6)$$

$$A := \frac{1}{2\mu_0 SP^2 N^2} \quad (7)$$

式 (6) をラジアル力近似式と呼ぶ。以下では、ラジアル力近似式の妥当性を電磁界解析を用いて検証する。

2.2 鎖交磁束に関する仮定 本稿では、永久磁石が作る U 相鎖交磁束  $\psi_{um}$  と電流が作る U 相鎖交磁束  $\psi_{ui}$  が線形独立であると仮定する。U 相鎖交磁束  $\psi_{ui}$  は、

$$\psi_u(\theta) = \psi_{um}(\theta) + \psi_{ui}(\theta) \quad (8)$$

となる。本稿で用いるモータは、12P18S の集中巻 IPMSM である。そのため、永久磁石が作る U 相鎖交磁束  $\psi_{um}(\theta)$  を、式 (9) と定義する。

$$\psi_{um}(\theta) = \psi_{1m} \cos \theta + \psi_{5m} \cos 5\theta + \psi_{7m} \cos 7\theta \quad (9)$$

基本波磁束に対して、5 次、7 次の鎖交磁束が逆位相の場合には、 $\psi_{5m}$ 、 $\psi_{7m}$  は負の値にもなりうる。また、本稿では 1 1 次以上の項は無視する。以下では対称性から U 相のみを扱う。本稿で用いる IPMSM のパラメータを表 1 に示す。ただし、無負荷時の 1 ティースに働く 6 次ラジアル力  $F_{6:\text{moload}}$  と 6 次コギングトルク  $T_{6:\text{cog}}$  の振幅は、電気角  $\theta$  を用いて、 $F_{6:\text{moload}} \cos 6\theta$ 、 $T_{6:\text{cog}} \sin 6\theta$  と定義している。なお、d 軸インダクタンス  $L_d$ 、トルク係数  $K_t$  は  $i_d$ 、 $i_q$  をそれぞれ 1A 流した時の電磁界解析結果より計算している。

## 3. d 軸高調波電流が 6 次ラジアル力に及ぼす影響

d 軸高調波電流指令値  $i_{dh}$  を、 $i_{dh} = I_{d6} \cos(6\theta - \theta_{d6})$  と定義する。dq 軸から UVW 相への変換行列  $C_{dq}^{uvw}$  には絶対変換を用いる。電流が作る U 相鎖交磁束  $\psi_{ui}$  は、式 (10) となる。

$$\begin{bmatrix} \psi_{ui} \\ \psi_{vi} \\ \psi_{wi} \end{bmatrix} = C_{dq}^{uvw} \begin{bmatrix} L_d I_{d6} \cos(6\theta - \theta_{d6}) \\ 0 \end{bmatrix}$$

表 1 IPMSM パラメータ

Table 1. Parameters of IPMSM

turn number $N$	20
a pair of poles $P$	6
teeth area $S$ [m <sup>2</sup> ]	$4.13 \times 10^{-4}$
$\psi_{m1}$ [mWb]	36.2
$\psi_{m5}$ [mWb]	0.811
$\psi_{m7}$ [mWb]	-0.114
$K_t$ [Nm/A]	0.262
$L_d$ [mH]	0.866
$T_{6:\text{cog}}$ [Nm]	-0.579
$F_{6:\text{no load}}$ [N]	0.382

$$= \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{1}{6}}L_d I_{d6} \cos(5\theta - \theta_{d6}) + \sqrt{\frac{1}{6}}L_d I_{d6} \cos(7\theta - \theta_{d6}) \\ \sqrt{\frac{1}{6}}L_d I_{d6} \cos(5\theta - \theta_{d6} + \frac{2}{3}\pi) + \sqrt{\frac{1}{6}}L_d I_{d6} \cos(7\theta - \theta_{d6} - \frac{2}{3}\pi) \\ \sqrt{\frac{1}{6}}L_d I_{d6} \cos(5\theta - \theta_{d6} + \frac{4}{3}\pi) + \sqrt{\frac{1}{6}}L_d I_{d6} \cos(7\theta - \theta_{d6} - \frac{4}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (10)$$

よって、U 相鎖交磁束  $\psi_u(\theta)$  は式 (11) となる。

$$\begin{aligned} \psi_u(\theta) = & \psi_{1m} \cos \theta \\ & + \psi_{5m} \cos 5\theta + \sqrt{\frac{1}{6}}L_d I_{d6} \cos(5\theta - \theta_{d6}) \\ & + \psi_{7m} \cos 7\theta + \sqrt{\frac{1}{6}}L_d I_{d6} \cos(7\theta - \theta_{d6}) \end{aligned} \quad (11)$$

となる。式 (11) を式 (6) に代入し、6 次成分  $F_{r6}$  のみ取り出すと、

$$F_{r6} = \frac{\psi_{1m} A}{2} \left\{ (\psi_{5m} + \psi_{7m}) \cos 6\theta + 2\sqrt{\frac{1}{6}}L_d I_{d6} \cos(6\theta - \theta_{d6}) \right\} \quad (12)$$

$$K_{r6} := \psi_{1m} A \sqrt{\frac{1}{6}}L_d \quad (13)$$

ここで、 $K_{r6}$  は、 $I_q$  の値に対する 6 次ラジアル力の増加率を表す定数である。0, 2, 4, 8 次成分は本稿では扱わない。電磁界解析として、 $\theta_{d6} = 0$  [deg] の際に  $I_{d6}$  の値を変化させた際の 6 次ラジアル力の絶対値と電磁界解析結果を図 2 に示す。 $I_{d6} = 0$  の際の解析結果がずれているため、オフセットが生じているが、 $I_{d6}$  の変化に対して 6 次ラジアル力の変化率は精度よく近似できている。 $I_{d6} = 0$  のモデルと解析の誤差の原因として、永久磁石起因の高調波磁束に対しては、回転子位置変化による空間高調波が大きく、式 (4), (5) の近似が成立しないことに起因すると考えており、今後の課題となる。解析結果を最小二乗法にて 1 次関数に近似すると、傾きが 0.852 となった。表 1 を用いて  $K_{r6}$  を計算すると、0.866 [N/A] となり、ラジアル力近似式は、 $I_{q6}$  に対する 6 次ラジアル力の増加率を精度よく近似出来ている。

#### 4. q 軸高調波電流が 6 次ラジアル力に及ぼす影響

4.1  $I_{q6}$  の影響 q 軸高調波電流  $i_{qh}$  を、 $i_{qh} =$

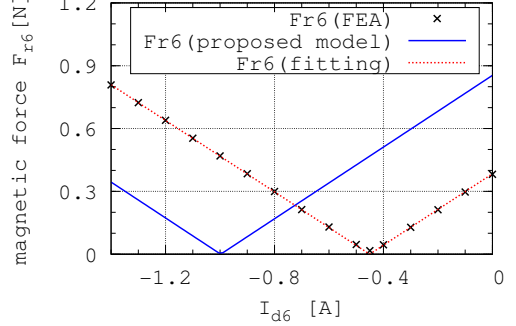
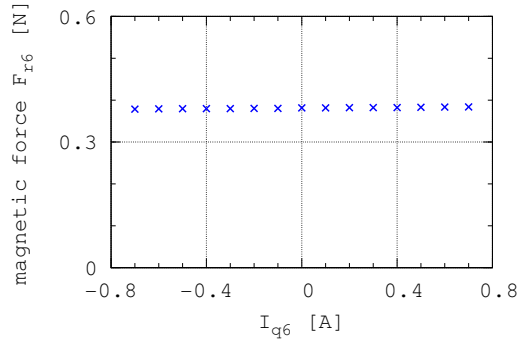
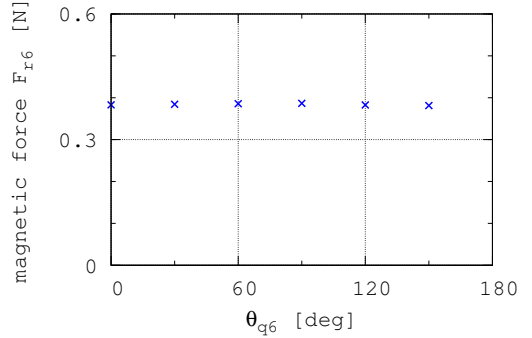


図 2  $I_{d6}$  の 6 次ラジアル力に対する影響 ( $\theta_{d6} = 0$ )



(a)  $I_{q6}$  のラジアル力に対する影響 ( $\theta_{q6} = 0$ )



(b)  $\theta_{q6}$  のラジアル力に対する影響 ( $I_{q6} = 0.5$ )

図 3 電磁界解析結果

$I_{q6} \sin(6\theta - \theta_{q6})$  と定義する。d 軸高調波電流の時と同様に q 軸高調波電流による鎖交磁束  $\psi_{ui}(\theta)$  を計算すると、式 (14) となる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \psi_{ui} \\ \psi_{vi} \\ \psi_{wi} \end{bmatrix} &= C_{dq}^{uvw} \begin{bmatrix} 0 \\ L_q I_{q6} \sin(6\theta - \theta_{q6}) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -\sqrt{\frac{1}{6}}L_q I_{q6} \cos(5\theta - \theta_{q6}) + \sqrt{\frac{1}{6}}L_q I_{q6} \cos(7\theta - \theta_{q6}) \\ -\sqrt{\frac{1}{6}}L_q I_{q6} \cos(5\theta - \theta_{q6} + \frac{2}{3}\pi) + \sqrt{\frac{1}{6}}L_q I_{q6} \cos(7\theta - \theta_{q6} - \frac{2}{3}\pi) \\ -\sqrt{\frac{1}{6}}L_q I_{q6} \cos(5\theta - \theta_{q6} + \frac{4}{3}\pi) + \sqrt{\frac{1}{6}}L_q I_{q6} \cos(7\theta - \theta_{q6} - \frac{4}{3}\pi) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

3節と違い、5次の符号が違う点に注意する。U相鎖交磁束  $\psi_u(\theta)$  は、式(15)となる。

$$\begin{aligned}\psi_u(\theta) = & \psi_{1m} \cos \theta \\ & + \psi_{5m} \cos 5\theta - \sqrt{\frac{1}{6}} L_q I_{q6} \cos(5\theta - \theta_{q6}) \\ & + \psi_{7m} \cos 7\theta + \sqrt{\frac{1}{6}} L_q I_{q6} \cos(7\theta - \theta_{q6})\end{aligned}\quad (15)$$

となる。式(15)を式(6)に代入し、6次成分  $F_{r6}$  のみ取り出すと、式(16)となる。

$$F_{r6} = \frac{\psi_{1m} A}{2} \left\{ (\psi_{5m} + \psi_{7m}) \cos 6\theta \right\}\quad (16)$$

式(16)より、q軸高調波電流による高調波磁束成分が6次ラジアル力には全く寄与しないことを示している。電磁界解析においても同様の結果となるが、 $\theta_{q6} = 0$  [deg]として、 $I_{q6}$ を変化させた時と  $I_{q6} = 0.5$  [A]として、 $\theta_{q6}$ を変化させた時の電磁界解析結果を図3に示す。図3から、q軸高調波電流はラジアル力に影響を及ぼさないことが解析上でも確認出来る。

#### 5. 6次トルクリプルと6次ラジアル力の同時制御

トルクの理論式より、 $i_{q0} = 0$ のトルクは式(17)で表せる。

$$T(\theta) = K_t i_{qh}(\theta) + P(L_d - L_q) i_{dh}(\theta) i_{qh}(\theta) + T_{\text{cog}}(\theta)\quad (17)$$

$dq$ 軸6次高調波電流により、0次、12次のリラクタンストルクが発生し、6次 $d$ 軸高調波電流は6次トルクリプルには影響を与えない。よって、6次トルクリプル  $T_{\theta 6}(\theta)$ は、式(18)となる。

$$T_{\theta 6}(\theta) = K_t i_{qh}(\theta) + T_{6:\text{cog}} \sin 6\theta\quad (18)$$

本稿では12次成分の理論考察は行わず、解析結果のみ示す。 $q$ 軸高調波電流が6次ラジアル力に影響を及ぼさないことは4節で示しているため、以上の結論から $dq$ 軸6次高調波電流を用いることで6次ラジアル力及び6次トルクリプルをそれぞれ独立に制御出来る。

本稿ではトルクリプル抑制制御として、6次コギングトルクの振幅、位相を電磁界解析で求め、それと逆位相のトルクを発生するように $q$ 軸電流を流す。 $q$ 軸補償電流  $I_{q6}$ は式(19)となる。

$$I_{q6} = -\frac{T_{6:\text{cog}}}{K_t}\quad (19)$$

本稿で用いるモータでは、 $I_{q6} = 2.21$  [A]である。

6次ラジアル力抑制制御のための補償電流振幅は、式(20)のように  $i_q = 0$ の6次ラジアル力  $F_{6:\text{no load}}$ の電磁界解析結果及び式(13)の係数から決定する。

$$I_{d6} = -\frac{F_{6:\text{no load}}}{K_{r6}}\quad (20)$$

本稿で用いるモータでは、 $I_{d6} = -0.446$  [A]である。

6次トルクリプル抑制制御、6次ラジアル力抑制制御の

電磁界解析結果を図4に示す。図4では、ラジアル力、トルクリプルを周波数解析し、6次、12次を抽出した結果を示している。6次ラジアル力  $F_{r6}$  に対しては、1ティースにかかる力 [N] で表記し、6次トルクリプル  $T_{\theta 6}$  に対しては、ロータにかかるトルク [Nm] の次で表記している。

6次ラジアル力と6次トルクリプルの同時抑制を実現できており、同時抑制制御によって、ラジアル力は96[%]、トルクリプルは99[%]以上低減出来ている。図4(b), 4(h)を比較すると、トルクリプル抑制制御により、トルクリプル12次成分が30[%]程度増加している。また、 $I_{q6}$ の振幅が大きいため、図4(c), 4(i)から6次ラジアル力の増加が確認出来る。

#### 6. 実験

実験では、負荷モータで速度制御をかけた状態で、高調波電流による振動現象の変化を測定する。駆動モータのケース表面に3軸加速度計を貼り、半径方向、周方向の加速度を周波数解析して評価する。振動を大きく測定するため、駆動用モータは、バックヨークが5 mmと一般のモータと比べ薄く作ってある。

実験結果を図5に示す。回転数は、375 rpmに制御しており、電気次数6次は、225 Hzである。捩れ共振周波数が250 Hz付近のため、周方向振動が大きく発生している。また、電磁界解析から得られたq軸高調波電流指令値と実際の実験での  $a_\theta$ の低減効果から、q軸高調波電流指令値を解析結果より減少させて試験している。

図5(b), 5(h)を比較すると、理論通り6次周方向振動は抑制でき、12次周方向振動は増大した。ただ、図5(c), 5(i)を比較すると、電磁界解析結果からの予測よりも6次半径方向振動が悪化した。図5(c), 5(f)と図5(i), 5(l)をそれぞれ比較すると、ラジアル力制御のための $d$ 軸高調波電流により、6次半径方向振動が低減していることが確認できる。図5(h), 5(k)から、ラジアル力制御によって、6次周方向振動も低減しており、6次ラジアル力の周方向への伝達が減ったためと考えられるが、図5(b), 5(e)では逆に悪化しているので、今後詳細に検討していく。全体として、周及び半径方向で6次高調波電流により12次振動成分が増加した。

実験結果と電磁界解析結果の誤差としては、本稿で考えてきたティースに働く電磁加振力の他に磁歪による振動現象<sup>(13)</sup>の影響も考えられ、磁歪がどの程度振動に寄与するのか、更なる検証が望まれる。

#### 7. 結論

本稿では、鎖交磁束に着目し、簡易な6次ラジアル力モデルを提案した。ラジアル力近似モデルから $d$ 軸高調波電流により、1ティース全体に働くラジアル力を抑制した。また、q軸高調波電流とラジアル力の関係を  $i_{q0} = 0$ において考察し、q軸高調波電流が6次ラジアル力に寄与しないことをラジアル力近似式及び電磁界解析より示した。以上の結果から、q軸高調波電流を用いた6次トルクリプル抑制制御と $d$ 軸高調波電流を用いた6次ラジアル力抑制制御

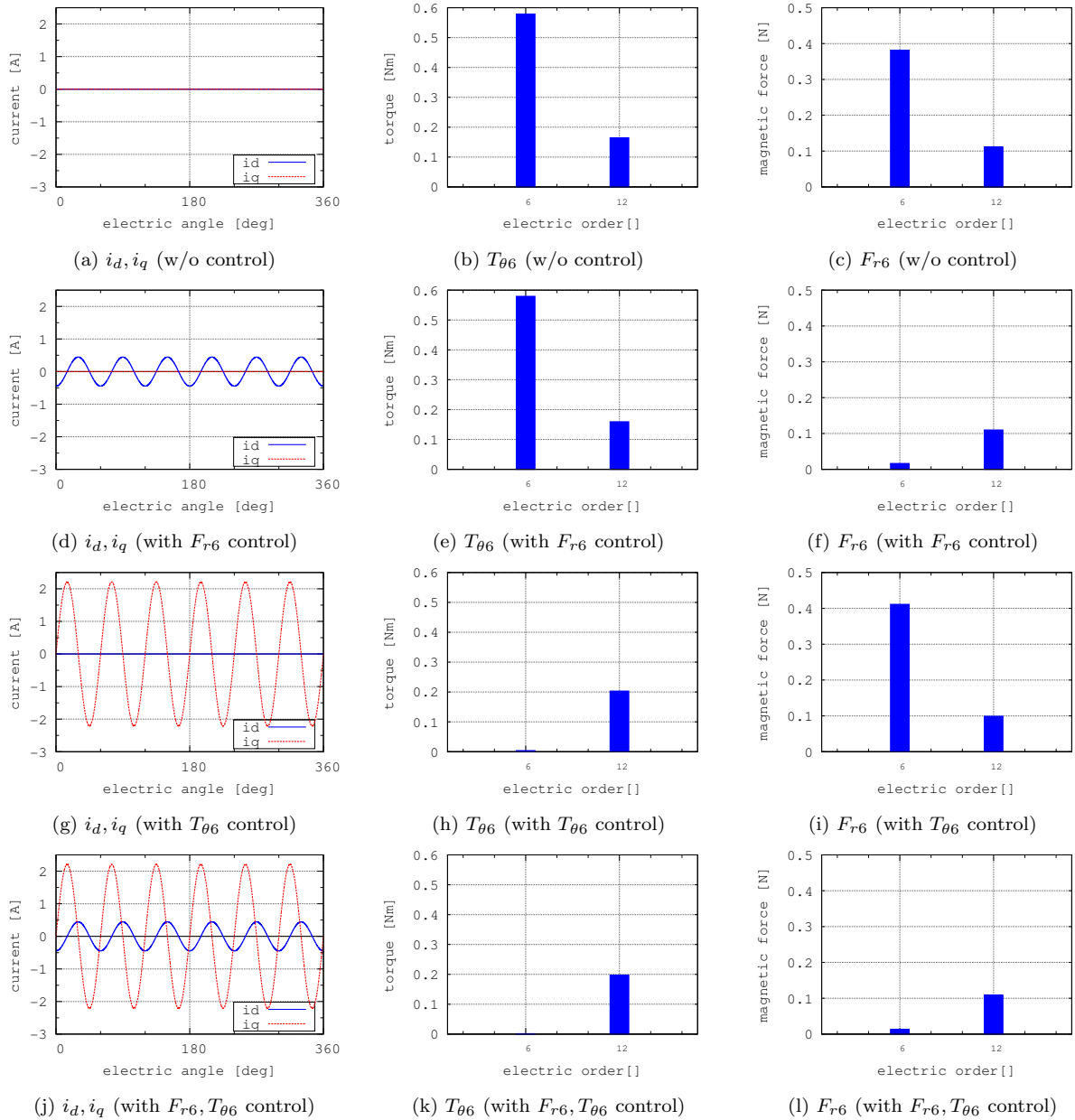


図4 電磁界解析結果

Fig. 4. Simulation results

を干渉なく同時に実現できることを電磁界解析により示した。実験においても振動抑制効果は見られたが、干渉の影響が見られた。

今後、実験結果においては、未だ原因の不明瞭な現象がみられるため、振動測定点を増やし、より詳細に検討していく。 $i_{q0} \neq 0$ の条件でのラジアル力近似式を今後拡張し、検討していく。また、振動が顕著となる高回転域での高調波電流制御を今後検討していく。

#### 参考文献

(1) T. Hattori, K. Narita, Y. Sakashita, T. Yamada, K. Hanaoka, and K. Akatsu: "Modeling Method of Vibration Analysis Model for Permanent Magnet Motor", IEE

of Japan Technical Meeting Record, MAG-10-38, No. 26, pp. 61–66, 2010(in Japanese).

- (2) Tao Sun, Ji-Min Kim, Geun-Ho Lee, Jung-Pyo Hong, Myung-Ryul Choi: "Effect of Pole and Slot Combination on Noise and Vibration in Permanent Magnet Synchronous Motor," Magnetics, IEEE Transactions on , vol.47, no.5, pp.1038-1041, May 2011
- (3) T. Kobayashi, Y. Takeda, M. Sanada, and S. Morimoto: "Vibration Reduction of IPMSM with Concentrated Winding by Making Holes", T.IEEJapan, Vol. 124-D, No. 2, pp. 202–207, 2004(in Japanese).
- (4) Y. Asano, Y. Honda, Y. Takeda, and S. Morimoto: "Reduction of Vibration on Concentrated Winding Permanent Magnet Synchronous Motors with Considering Radial Stress.", T.IEEJapan, Vol. 121-D, No. 11, pp. 1185–1191, 2001 (in Japanese).
- (5) R. Takahata, S. Wakui, K. Miyata, K. Noma, and M. Senoo: "Study on Reduction in Vibrations of Concentrated Winding Permanent Magnet Synchronous Motor by

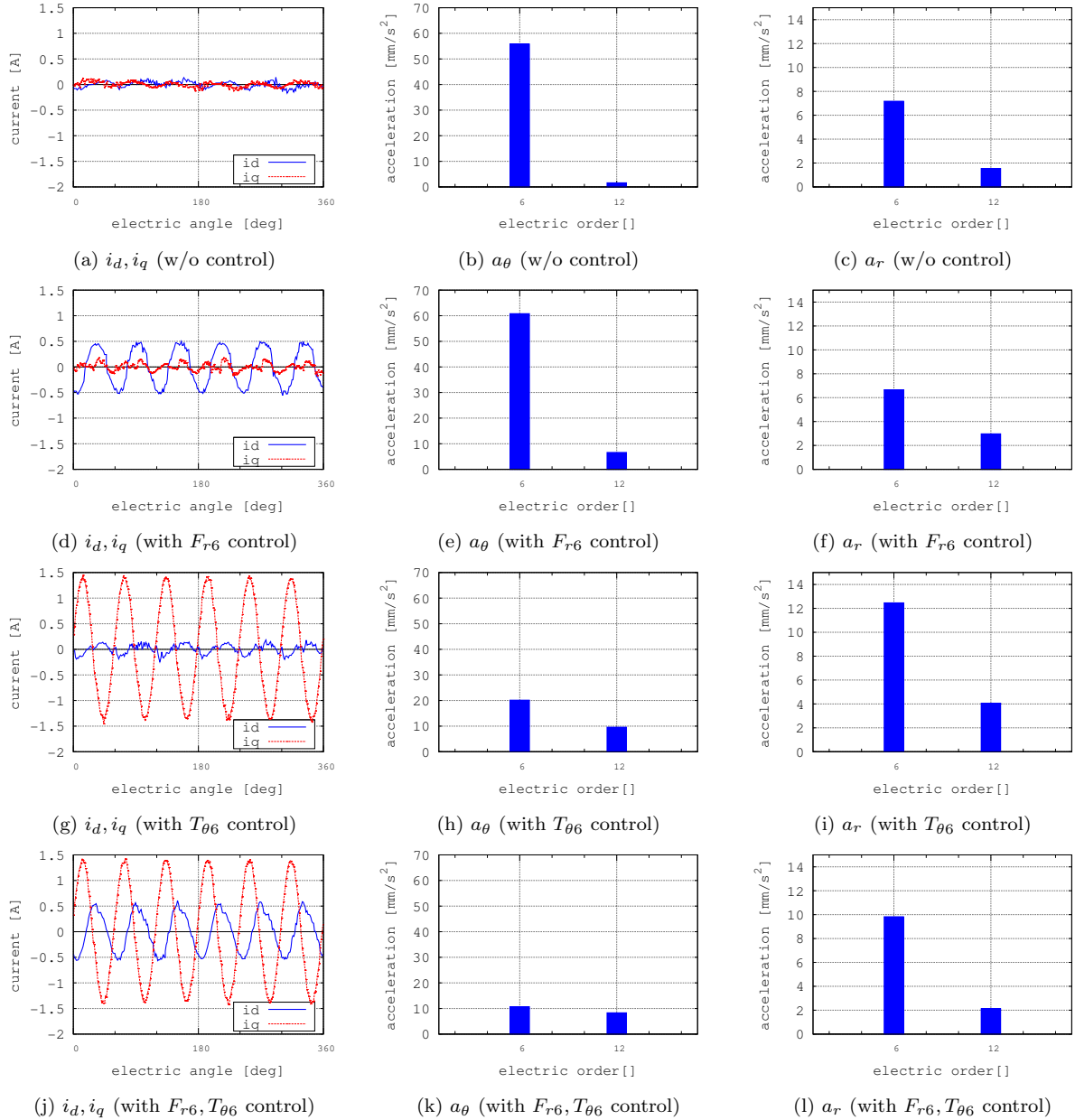


図5 実験結果

Fig. 5. Experimental results

- Skew Effects of Rotor”, T.IEEJapan, Vol. 132-D, No. 2, pp. 278-287, 2012(in Japanese).
- (6) H. Yashiro and H. Takada: “Reduction of a Radial Electromagnetic Oscillating Force of an Electrical Motor by Superposing a High Order Current”, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. C, Vol. 72, No. 715, pp. 723-728, 2006(in Japanese).
- (7) E. Zeze, K. Akatsu: “Vibration improvement by current hysteresis control for PM motor”, JIASC2012, pp. III-149-152 (2012)(in Japanese)
- (8) Z.Q. Zhu, et al: “Analytical modeling and finite-element computation of radial vibration force in fractional-slot permanent-magnet brushless machines.” Industry Applications, IEEE Transactions on 46.5 (2010): 1908-1918.
- (9) Divandari, M.; Dadpour, A.; , “Radial force and torque ripple optimization for acoustic noise reduction of SRM drives via fuzzy logic control.” Industry Applications (INDUSCON), 2010 9th IEEE/IAS International Conference on , vol., no., pp.1-6, 8-10 Nov. 2010
- (10) T. Miyakawa: “EV 用モータの振動騒音のメカニズムと最新の解析技術について”, 第31次モータ技術フォーラム, 2012-12-21.
- (11) M. Kanematsu, T. Miyajima, H. Fujimoto, Y. Hori, T. Enomoto, M. Kanayama, T. Miyakawa, and K. Yoshimoto: “Radial Force Control of IPMSM Considering Magnetic Flux Distribution on No-Load Condition”, IEE of Japan Technical Meeting report, VT, No. 7, 2012(in Japanese).
- (12) M. Kanematsu, T. Miyajima, H. Fujimoto, Y. Hori, T. Enomoto, M. Kanayama, T. Miyakawa, and K. Yoshimoto: “Base Study on Radial Force Reduction with d-axis Current Considering Magnetic Flux Distribution”, JIASC2012, pp. III-215-218 (2012)(in Japanese)
- (13) F. Ishibashi, S. Noda, S. Yanase, and T. Sasaki: “Magnetostriction and Motor Vibration”, T.IEEJapan, Vol. 123-A, No.6, pp. 569-573, 2003(in Japanese).