

IPMSM 駆動電気自動車の dq 両軸の電流制御を利用した スリップ抑制制御のためのトルク垂下特性の改善

佐竹正光*, 河島清貴, 内田利之, 堀洋一 (東京大学)

Improvement of Torque Reduction Characteristic for Skid Prevention Control of EVs driven by IPMSM
using both of dq-Axes Currents

Masamitsu Satake*, Kiyotaka Kawashima, Toshiyuki Uchida, Yoichi Hori (University of Tokyo)

Abstract

In order to control the output torque according to the position of the accelerator pedal, strong feedback current control is usually given to the driving motor of EV. However, if the motor torque is kept at its command value quickly and precisely, the tire speed will increase drastically when tire slip occurs. In this paper, we propose skid prevention control based on torque reduction characteristics using both of dq-axes currents of IPMSM. Finally, we show the advantages of proposed method by experiments.

キーワード：電気自動車, スリップ抑制, トルク垂下特性, dq 軸, 埋込磁石型同期電動機
(electric vehicle, skid prevention, torque reduction characteristics, dq-axes, IPMSM)

1. はじめに

世界中で環境問題が深刻化している中、総合エネルギー効率が高く CO₂ 総排出量も少ない⁽¹⁾ エコカーとして、電気自動車 (EV) が注目を集めている。

しかし、電気モータで駆動する電気自動車には、高速なトルク応答、発生トルクの正確な把握が可能、といった特徴⁽²⁾から、環境性だけでなく車両運動制御においても大きな魅力がある。この高い制御性を活かす適用対象の一つとして、車輪の空転防止制御、粘着制御を挙げることができるが、すでに多くの研究が行われている⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。車輪空転現象は、車輪慣性が車両重量に対し軽い事に起因して、自動車の中でも特に時定数が小さい現象である。そのため、モータの応答の速さを活かす最適な対象の一つと考えられる。

我々はこれまで、スリップ発生時にトルクが急激に減少するような特性を実現する電流制御について研究してきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。本稿では、このトルク垂下特性を利用したスリップ抑制制御を IPMSM (埋込磁石型同期電動機) の dq 軸電流制御系へ拡張し、dq 各軸についてそれぞれ電流垂下特性を実現する。さらにその垂下特性を調整可能とする電流制御法についても提案する。また、各制御手法については実験を行い、その効果を検証した。

2. 車両と電気モータのモデル

2.1 車両の運動方程式と慣性項近似 車両の運動を前後方向のみに限定し、モータ時定数、走行抵抗がともに十分小さいと仮定すると、車両に働く力は図 1 のようになり、車輪と車体の運動方程式は以下のように表現できる。

$$J_\omega \dot{\omega} = T - rF_d \dots \dots \dots (1)$$

$$M\dot{V} = F_d \dots \dots \dots (2)$$

ここで各変数は、モータ回転速度 ω , 車体速度 V , 車輪速度 $V_\omega = r\omega$, モータトルク T , 駆動力 F_d とする。各定数は、車輪慣性モーメント J_ω , 車体重量 M , タイヤ半径 r である。また、車輪速度と車体速度の比であるスリップ率 λ は以下の式で定義される。走行中にスリップが発生すると、車輪速度 V_ω が車体速度 V に比べて大きくなりスリップ率 λ が上昇する。

$$\lambda = \frac{V_\omega - V}{\max(V_\omega, V)} \dots \dots \dots (3)$$

式 (1)~(3) をそれぞれ整理し、走行抵抗が無視できるほど微小でスリップ率の変動しない定常状態を仮定すると、モータから見た車両モデルの伝達関数 ω/T は次式で近似できる。

$$\frac{\omega}{T} \simeq \frac{1}{\{J_\omega + r^2M(1-\lambda)\}s} = \frac{1}{J(\lambda)s} \dots \dots \dots (4)$$

$J(\lambda) = J_\omega + r^2M(1-\lambda)$ は車輪と車体を合わせて換算した慣性モーメントであり、スリップ率の関数となる。つまり電気自動車の駆動源であるモータから見るとスリップ率の上昇は、 $J(\lambda)$ という慣性の軽減と捉えることができる。

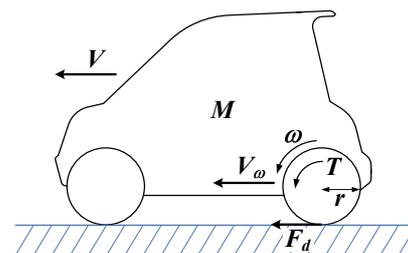


図 1 車両の運動

Fig. 1. The motion of vehicle.

2・2 DC モータの回路方程式とトルク・逆起電力
DC モータにおいて、その回路方程式、回転角速度と逆起電力の関係式、トルクと電流の関係式は次の通りである。

$$v^* = (R + sL)i + v_{emf} \dots\dots\dots (5)$$

$$v_{emf} = \omega\varphi_f \dots\dots\dots (6)$$

$$T = i\varphi_f \dots\dots\dots (7)$$

これらの関係から、EV に搭載された電気モータのブロックは図 2 のように表される。それぞれ、電機子抵抗 R 、電機子インダクタンス L 、永久磁石界磁による鎖光磁束 φ_f であり、 v^* はモータへの入力電圧、 i は実際のモータ電流、 i^* は電流指令値、 v_{emf} は逆起電力を表す。

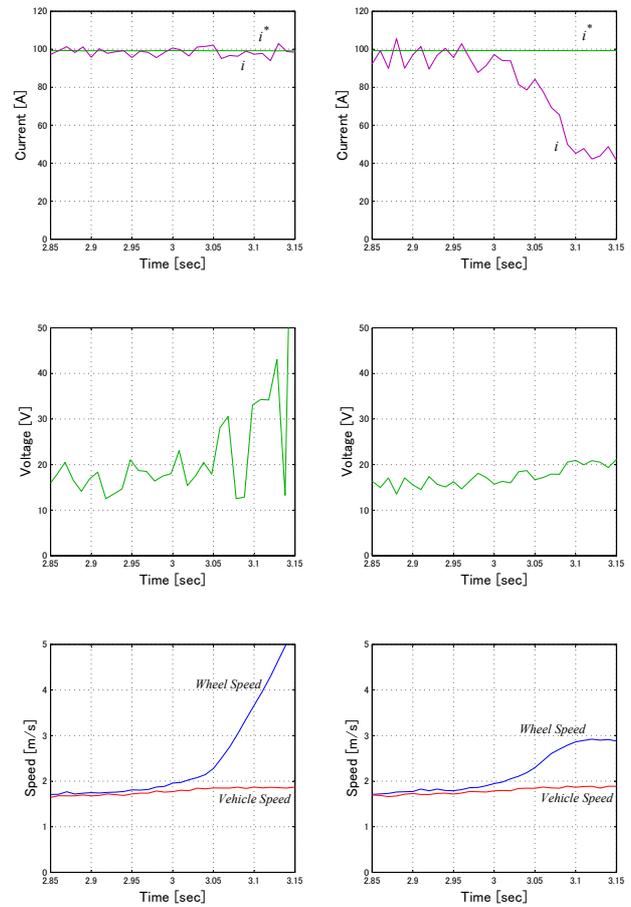
3. トルク垂下特性改善による電気自動車のスリップ抑制
式 (5)~(7) からトルク T を求めると次式ようになる。

$$T = \frac{\varphi_f}{R + sL} (v^* - \omega\varphi_f) \dots\dots\dots (8)$$

この関係より、定電圧で運転中においては回転速度が大きくなるに従って、トルクつまり電流の値は直線的に減少する。このような特性はトルク（電流）垂下特性と呼ばれている。本研究では、車輪スリップの発生時、この垂下特性を制御によって実現することでスリップを抑制する手法を提案している。図 5 は、(a) 従来どおりのフィードバック (FB) 電流制御と、(b) スリップ時にトルク垂下特性を実現するフィードフォワード (FF) 電流制御との比較実験結果である。定トルク（電流）指令で加速中の EV が $t=3s$ から滑りやすい路面に侵入している。FB 制御では路面変化後も指令通りのトルク（電流）値を維持し続けており、車輪速度は急上昇している。FF 制御の場合、車輪が空転が大きくなるにつれ電流値が減少し、車輪速度の急上昇が抑えられている。

3・1 FB 電流制御 電気自動車に搭載された DC モータに対して、従来手法である FB 電流制御を施したブロック図が図 3 である。FB 制御では PI 制御器の各ゲインを大きく設定し、電流センサにより測定した実際の電流（トルク）値を常に指令値に追従させるように制御する。図 5 のように、例えスリップが発生しようとも電流を指令値通りに保とうとする。スリップ後はモータの回転速度が急上昇し逆起電力も大きくなるため、FB 制御器はモータへの入力電圧をどんどん大きくしてしまっている。

3・2 FF 電流制御によるトルク垂下 一方図 4 は、FF 電流制御を施したブロック図である。FF 制御では、電流指令値に応じた電圧を逆算、電機子の電圧降下補償分 v_{RL} と逆起電力補償分 v_{emf}^* それぞれの和をモータの入力電圧として与える。逆起電力補償分は、非スリップ時の総慣性



(a) FB current control (b) FF current control

図 5 トルク垂下特性を利用したスリップ抑制
Fig. 5. Skid prevention control based on torque reduction characteristic.

モーメントとトルク指令値の積を積分したものを非スリップ状態相当のモータ回転速度とし、磁束 φ_f の積で求める。スリップが発生した場合、車輪回転速度は急激に上昇し、回転速度に比例する逆起電力 v_{emf} も急上昇する。一方で、逆起電力補償分 v_{emf}^* は非スリップ時のノミナル慣性値に基づいた値であり、電流指令値が変わらなければ、スリップ前と同様の加速度で変化する。結果、実際の逆起電力は FF 補償分を大きく上回ることになり、この逆起電力の実際値と補償分の差が電流（トルク）の垂下を引き起こし、車輪速度の急上昇を抑える。図 5 でも、FF 制御のモータ入力電圧はスリップ前後でほとんど変化していない。

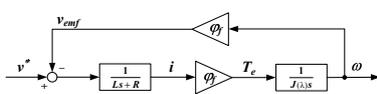


図 2 電気モータのブロック図
Fig. 2. DC motor installed in EV.

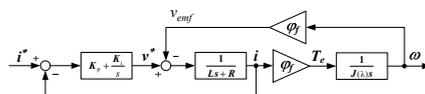


図 3 FB 電流制御のブロック図
Fig. 3. FB current control.

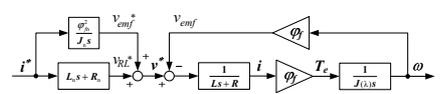


図 4 FF 電流制御のブロック図
Fig. 4. FF current control.

3-3 FF+DOB 制御によるトルク垂下特性の調整

FF 制御器のみの制御ではトルク垂下の特性はモータ固有のパラメータで一意に決まってしまうが、これに外乱オブザーバ (DOB) を付加することで垂下特性を調整することができる。この制御の効果については、すでに以前の報告⁽⁶⁾⁽⁷⁾で紹介している。今回、前報告と同様の実験を別のモータを搭載した別車両で行った。図 6,7 が実験車両の外観と駆動モータの諸元である。これまでの実験車と違って駆動モータはダイレクトドライブ (DD) となっているが、出力、トルク、回転数の各諸元は前実験車 (減速比約 6.3 のギアあり) のものとほぼ等しい。また、車両重量は前実験車両 300kg に対し 400kg と重くなっている。このようなモータや車両に違いがあるが、過去の報告同様にトルク垂下現象とスリップ抑制、DOB パラメータにより制御効果が調整可能であること、があらためて確認されたのでこれを示す。

図 8,9 は FF 制御に外乱オブザーバ (DOB) を組み合わせた FF+DOB 制御の実験結果であり、図 10 はそのブロック図である。トルク (電流) 垂下のもととなる実際の逆起電力と FF 制御補償分の差を外乱とみなし、外乱オブザーバで補償する形になっている。 K や τ の値により、トルク垂下効果を調整できる。実験は $t=0$ から定加速指令で走行中、およそ 2 秒後に路面状態が変化する (乾燥アスファルトから散水アクリル板) という条件で行った。図 8 は $\tau = 0.001$ で固定し、 K をパラメータとして変化させた際の各実験結果である。ゲイン K を小さくなるにつれて、スリップ発生直後からの電流垂下が高速になっており、電流垂下が速いほど、スリップ率も抑えられている。次に K を τ を変化させた実験結果を図 9 示す。外乱オブザーバの時定数 τ が十分に小さい場合、外乱部分 (ここではトルク垂下に寄与する逆起電力差) は完全に補償され、モータの電流垂下が生じない。反対に、時定数 τ が大きいと、外乱補償が遅くなるので、外乱部分の影響が電流に表れて垂下が発生する。



図 6 実験車両
Fig. 6. C-COMS2

図 7 モータ諸元

Fig. 7. Specification of vehicle

駆動形式	後輪インホイールモータ × 2 機
モータ種類	永久磁石同期電動機
ギア比	ダイレクトドライブ
最大出力	3.0[kW]
最大トルク	120[Nm]
最大回転数	600[rpm]

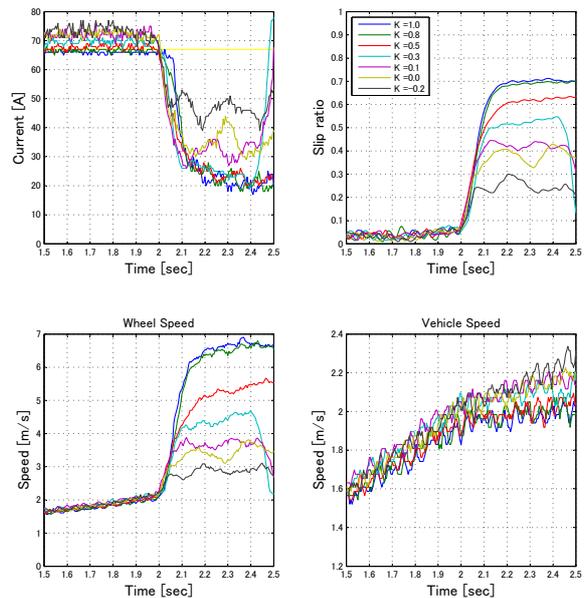


図 8 FF+DOB のスリップ実験結果 (K の調整)
Fig. 8. Tuning K of FF+DOB control.

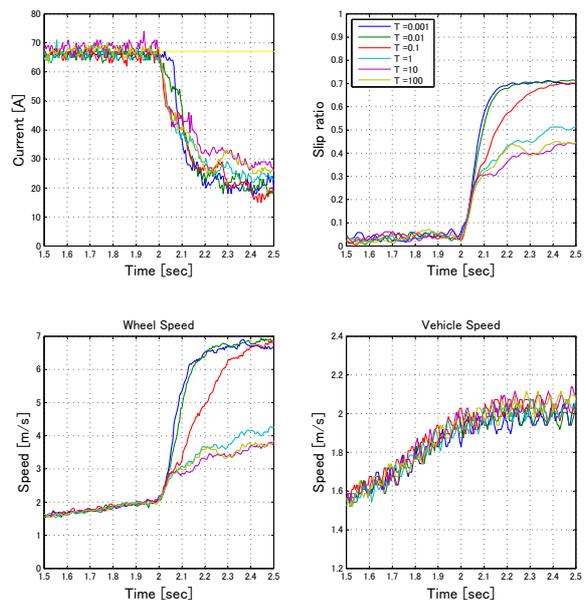


図 9 DOB のスリップ実験結果 (τ の調整)
Fig. 9. Tuning τ of FF+DOB control.

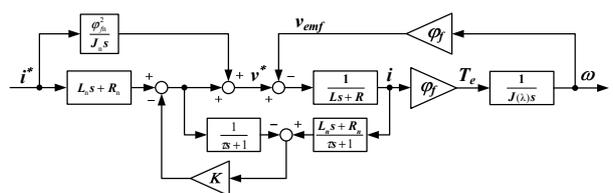


図 10 FF+DOB 電流制御のブロック図
Fig. 10. Block diagram of FF+DOB control.

4. IPMSM の dq 両軸電流をともに利用した

スリップ抑制制御のためのトルク垂下特性の改善

ここまでの説明では、簡単のために電気自動車に搭載されたモータを DC モータと考えて説明してきた。しかし、EV 用駆動モータの小型軽量化、高効率高出力化への要求により、電気自動車用モータは交流モータ、とくに永久磁石を用いた同期機の適用が一般的になりつつある。なかでも IPMSM(埋込磁石型同期電動機)は、電流位相を制御することでリラクタンストルクを利用した最大トルク制御が可能であり、弱め磁束制御が効きやすく広範囲運転にも向いているため、自動車への応用に適していると考えられている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。回転座標系(dq座標系)における IPMSM の電圧方程式とトルク式は次式で与えられる⁽¹⁰⁾。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + sL_d & -\omega_{re}L_q \\ \omega_{re}L_d & R + sL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{re}\varphi_f \end{bmatrix} \cdot (9)$$

$$T = \{\varphi_f + (L_d - L_q)i_d\}i_q \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 v_d, v_q は d, q 軸電圧、 i_d, i_q は d, q 軸電流 L_d, L_q は d, q 軸インダクタンスであり、 ω_{re} はモータの電気角速度である。(10) 式のもータトルクは、マグネットトルク $\varphi_f i_q$ とリラクタンストルク $(L_d - L_q)i_d i_q$ の和で決まる。電気自動車に搭載された(慣性が車両のスリップ率によって変化すると考えた) IPMSM ブロック図は図 11 のようになる。

これまで紹介してきた各制御手法は、搭載モータが IPMSM の場合でも実現可能である。実際に各制御の実験は、IPMSM 駆動の実験車両(図 6)を用いて行っている。ベクトル制御により dq 軸電流を独立に考え、d 軸側には FB 制御を施し、 $i_d=0$ 制御もしくは逆起電力分を除いた非干渉制御を行えば、q 軸側は図 2 のように DC モータと等価に扱える、あとは q 軸に対して各種トルク垂下利用の電流制御を適用すればよい⁽⁷⁾。

本節では、IPMSM では q 軸のみならず d 軸電流にも着目することで、よりスリップ抑制に効果的なトルク垂下特性が実現できると考え、それを実現するための電流制御系を提案し、実際に実験を行ったのでその結果を紹介する。

4.1 dq 各軸電流のトルク垂下特性への影響

$$i_d = \frac{1}{L_d s + R} \{v_d^* + \omega_{re}(L_q i_q)\} \dots\dots\dots (11)$$

$$i_q = \frac{1}{L_q s + R} \{v_q^* - \omega_{re}(L_d i_d + \varphi_f)\} \dots\dots\dots (12)$$

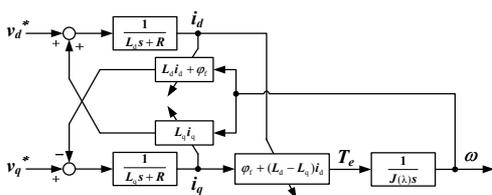


図 11 dq 座標で表した IPMSM のブロック図
Fig. 11. Block diagram of IPMSM.

上式は、(9) 式をそれぞれ dq 軸電流についてまとめたものである。ここで、入力電圧を以下のように制御する。

$$v_d^* = (L_d s + R_n)i_d^* - \frac{T^*}{J_n s} (L_q i_q) \dots\dots\dots (13)$$

$$v_q^* = (L_q s + R_n)i_q^* + \frac{T^*}{J_n s} (\varphi_f + L_d i_d) \dots\dots\dots (14)$$

このように両軸電流を FB 制御ではなく電圧入力が大きく変化しない FF 制御を適用すると、スリップ発生時には i_q は減少、 i_d は増加し、dq 両軸を利用したトルク垂下が実現できる。その効果として以下のようなものが考えられる。

- マグネットトルク $\varphi_f i_q$ のみならずリラクタンストルク $(L_d - L_q)i_d i_q$ の垂下にも効果的である。
- 逆起電力に干渉成分も加えた $\omega_{re}(L_d i_d + \varphi_f)$ は i_d の上昇に伴って増加し、 i_q 垂下の効果を高める。
- 逆交極性 ($L_d < L_q$) を有する IPMSM では、 i_d は i_q に比べ L 成分による垂下遅れの影響が小さい。

これらの特性を確認するために、dq 両軸とも FB 制御、d 軸 FF 制御、q 軸 FB 制御、d 軸 FB 制御、q 軸 FF 制御、dq 両軸とも FF 制御を行った場合についてそれぞれ実験を行った。各結果を図 13~16 に示す。実験条件は < 3.3 > 節と同様。

この実験結果から、dq 各軸の電流制御系に FF 制御を適用することで、スリップ時に i_q は減少、スリップ時に i_d は上昇することが確認できた。しかし、d 軸の電流垂下はほとんどスリップ抑制に寄与していないようで、 i_d が上昇してもトルクはほとんど変化しておらず、 i_q の垂下を促進する効果も確認できない。この原因は、今回の実験で使用したモータが永久磁石に偏ったものであったからだと思われる。実験機のパラメータはおよその値で、極対数 12、 $L_q=2.6\text{mH}$ 、 $L_d=2.3\text{mH}$ 、 $\varphi_f = 0.14\text{Wb}$ であり、 $\varphi_f : (L_q - L_d)$ と $\varphi_f : L_d$ の比はともに小さく、 i_d が上昇してもトルク、q 軸電流垂下速度にはあまり影響しないことがわかる。

4.2 DOB による d 軸電流垂下の調整

図 12 は dq 各軸に DOB を付加し、それぞれの電流垂下特性を調整可能とした制御ブロック図である。各軸 DOB のゲイン、時定数、 K_q, τ_q, K_d, τ_d の値により、電流垂下特性を調整する。

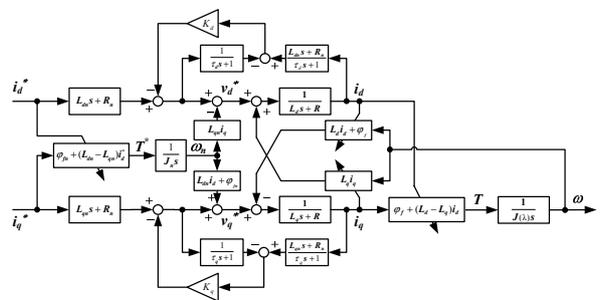


図 12 DOB による dq 各軸電流垂下特性の調整要素を備えた IPMSM の電流制御

Fig. 12. Skid prevention control based on torque reduction characteristics using both of dq-axes currents of IPMSM.

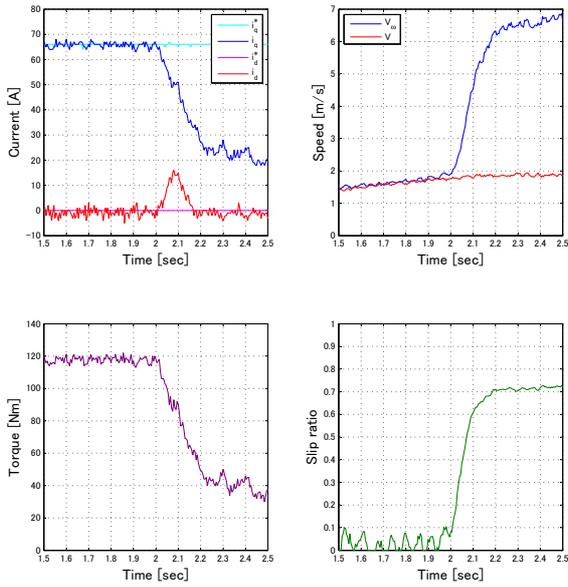


図 13 スリップ実験結果 (dq 両軸 FB 電流制御)
Fig. 13. without torque reduction characteristic.

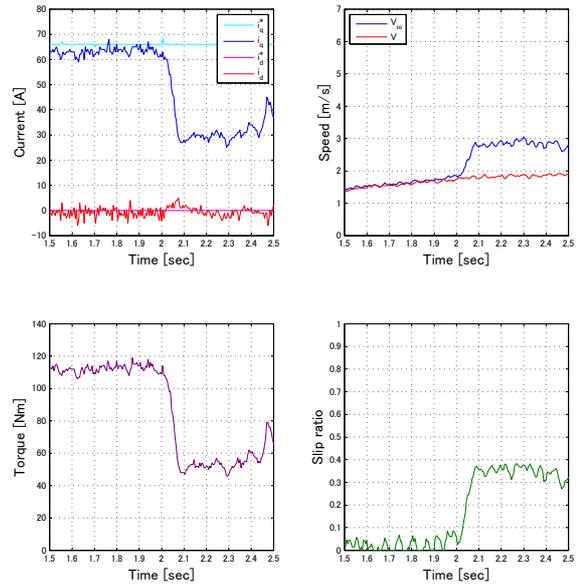


図 15 スリップ実験結果 (q 軸電流のみの垂下)
Fig. 15. Torque pendency only by q -axis current.

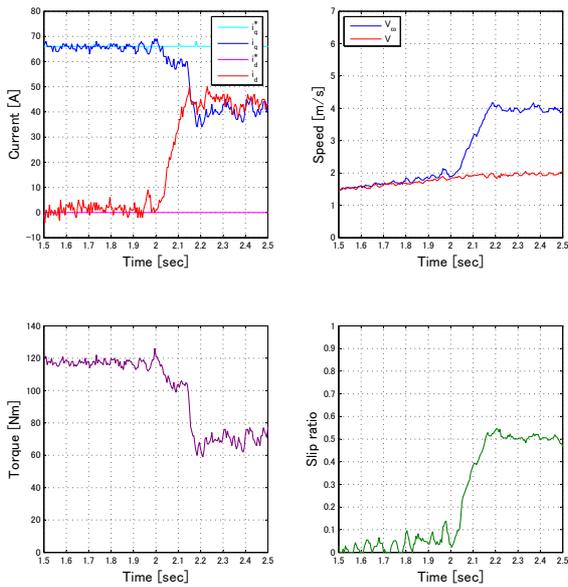


図 14 スリップ実験結果 (d 軸電流のみの垂下)
Fig. 14. Torque pendency only by d -axis current.

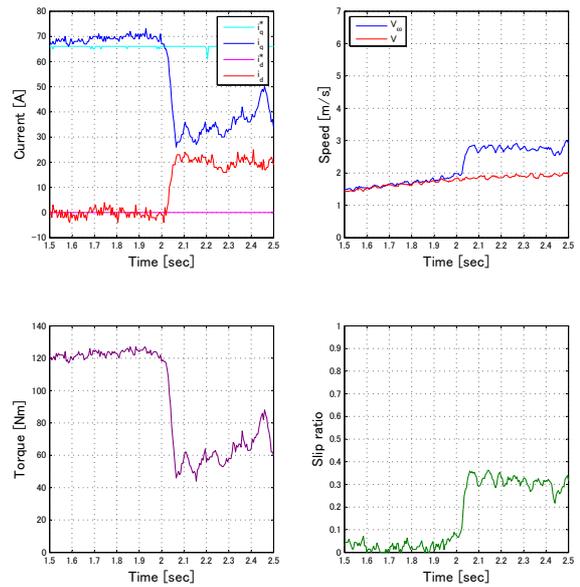


図 16 スリップ実験結果 (dq 軸電流ともに利用した垂下)
Fig. 16. Torque pendency using both of dq -axes current.

こちらについても実験を行っており、その実験結果を図 17,18 に示す。ここでは d 軸電流の垂下調整を試みる、図 17 は τ_d を 0.01 で固定し、 K_d をパラメータとして変化させた実験結果、図 18 は K_d を 1.0 で固定し、 τ_d をパラメータとして変化させた実験結果である。また、 q 軸側については $K_q = 1.0, \tau_q = 10$ と遅い外乱オブザーバとして設定しており、先の実験結果 (図 9) から、この場合には q 軸単独でもスリップ抑制に効果的な垂下特性を示すものである。結果

を確認すると、各ゲイン、時定数を変化させてもトルク、車輪速度の応答にはほとんど変化がない。これは上で述べたように使用したモータが d 軸電流が垂下を起こしてもスリップ抑制にはほとんど効果がない構造のためである。しかし、この実験ではトルク垂下そのものに影響はしていないものの、スリップ時の i_d 応答は、各パラメータによって変化していることが確認でき、 d 軸電流の垂下特性についても q 軸同様に調整が可能であることを証明できた。

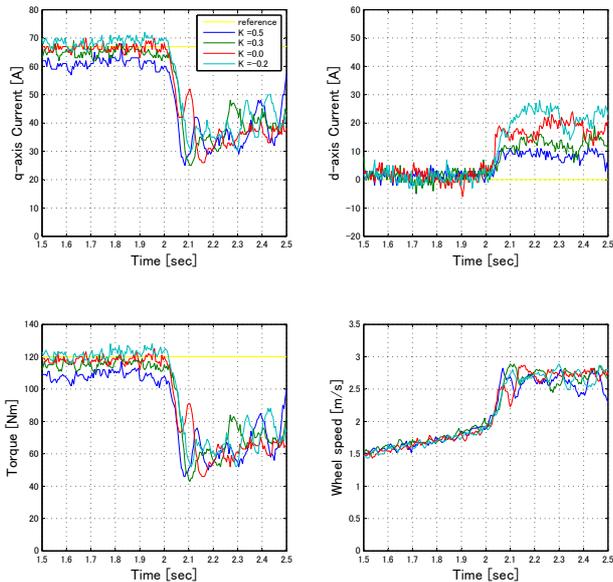


図 17 スリップ実験結果 (DOB による K_d の調整)
Fig. 17. Tuning K_d of FF+DOB d-axis current control.

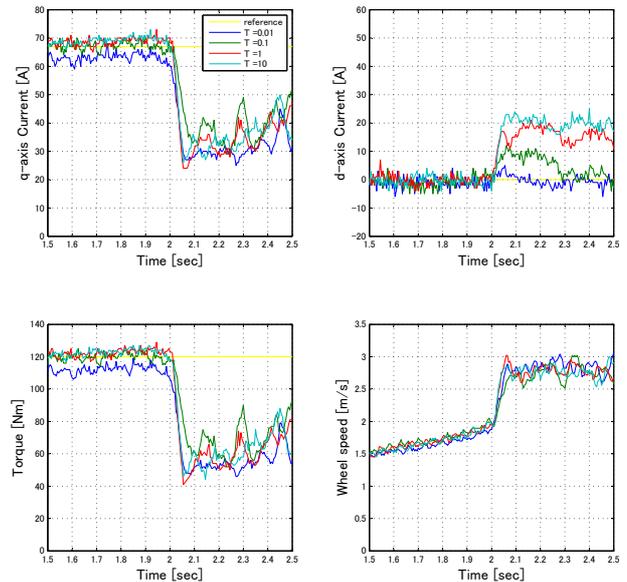


図 18 スリップ実験結果 (DOB による T_d の調整)
Fig. 18. Tuning T_d of FF+DOB d-axis current control.

5. まとめ

本稿では、空転発生時にトルク (電流) 垂下を起こすことでスリップ抑制を実現する電流制御法を、IPMSM の dq 軸電流制御系へ応用し、q 軸と d 軸の両軸それぞれに電流垂下特性を持たせることを実現した。そして、dq 両軸電流に対して DOB を適用することで垂下特性を調整可能にする電流制御法について提案した。スリップ実験では、dq 両軸電流それぞれに垂下特性が実現されていることを確認し、DOB によって dq 各軸の電流垂下調整ができることを示した。

今回の実験では使用したモータの突極比が小さく、さらに L_d, L_q に対して φ_f が非常に大きかったため、d 軸電流が垂下を起こしてもトルク垂下、q 軸電流垂下特性を直接向上させることはできなかった。だが、資源問題や広出力範囲運転の要求、逆起電力による素子への悪影響などの観点から、リラクタンストルク応用電動機はこれからの電気自動車用モータとして有力な選択肢の一つであり、その特性を考慮した車両制御は今後より重要になると考えられる。

今後の課題は、各モータにおいてスリップ抑制に効果的なトルク垂下を実現するための dq 軸電流垂下特性の適切な調整法や、パラメータ変動時の非スリップ時安定性とスリップ抑制効果の検討、リラクタンストルク比が高いモータでの実験などである。

参考文献

(1) JHFC 総合効率検討特別委員会 (財団法人 日本自動車研究所): “JHFC 総合効率検討結果報告書”, (2006) .

- (2) Y.Hori, Y.Toyoda, Y.Tsuruoka :“ Traction Control of Electric Vehicle: Basic Experimental Results Using the Test EV -UOT Electric March- ”, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.34, No.5, pp.1131-1138 (1998).
- (3) 小竹元基, 大島紀明, 永井正夫 :“ 駆動性向上を目指した超小型電気自動車の車輪速度制御 ”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.70, No.694, pp.1680-1686 (2004) .
- (4) K.Fujii, H.Fujimoto :“ Traction Control based on Slip Ratio Estimation Without Detecting Vehicle Speed for Electric Vehicle ”, Proc. of PCC-Nagoya'07, pp.688-693, (2007).
- (5) 小玉晋也, 堀洋一 :“ 他励直流モータのトルク垂下特性をまねることによる電気自動車のスリップ抑制制御 ”, 電学論 D, Vol.126, No.3, pp.248-254 (2006) .
- (6) 佐竹正光, 河島清貴, 内田利之, 堀洋一 :“ 電気モータのトルク垂下特性を利用したスリップ抑制制御の実験 ”, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-08-145, (2008) .
- (7) 佐竹正光, 河島清貴, 内田利之, 堀洋一 :“ IPMSM の dq 軸電流をともに利用したトルク垂下特性による電気自動車のスリップ抑制制御 ”, 平成 20 年電気学会産業応用部門大会 (2008) .
- (8) 新政憲, 堺和人 :“ 自動車用永久磁石リラクタンスマータの開発 ”, 電気学会誌, Vol.128, No.4, pp.231-234 (2008).
- (9) 岸部太郎, 玉木悟史, 西山典禎, 一海康文, 檜垣俊郎 :“ EV 用モータコントローラ ”, 電子情報通信学会技術研究報告 EMD, Vol.99, No.77, pp.25-30 (1999) .
- (10) 長谷川勝, 石川裕記 :“ 制御から見た電動機 ”, 平成 19 年電気学会産業応用部門大会 1-S7-2, pp.I59-I62 (2007) .