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

佐竹 正光, 河島 清貴, 内田 利之, 堀 洋一 (東京大学)

Skid Prevention Control of EVs

based on Torque Reduction Characteristics using both of dq-Axes Currents of IPMSM

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

In this paper, we introduce motor current control methods that have the torque reduction characteristics. And, it is shown that the slipping controlling effect improves by the torque decrease speed fast by the experiment result of changing the speed of the torque pendency. In addition, it proposes the current control method that causes a more high-speed torque pendency by using the interference element between dq-axes when IPMSM is used. By simulation, we verify its fast torque pendency and effectiveness to skid prevention.

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

Keywords: 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、電気モータを駆動源と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,粘着制御が挙げられ、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。

そんな中、我々はこれまで、スリップ発生時にはトルク が急激に減少するようなトルク垂下特性を備えた電流制御 について研究してきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。本稿では、トルク垂下の速度 を変化させた実験結果により、トルク減少が高速なほどス リップ抑制効果が向上することを示す。また、IPMSMの *dq* 軸間干渉成分を利用することで、より高速なトルク垂下 を起こす電流制御法を提案する。

2. トルク垂下特性による電気自動車のスリップ抑制

2・1 車両の1次元運動 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、運動方 程式は以下のように表現することができる。

$J_{\omega}\dot{\omega} = T - rF_d \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots $	(1)
$M\dot{V} = F_d$	(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。

式 $(1)\sim(3)$ をそれぞれ整理すると、トルク T とモータ回転速度 ω の関係 ω/T は次式で近似できる。

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

 $J(\lambda) = J_{\omega} + r^2 M(1 - \lambda)$ 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。つまりモータから見るとスリップ率の上昇は、 $J(\lambda)$ が軽くなったと捉えられる。



図1 車両の運動 Fig.1. The motion of vehicle.



図 2 FF 電流制御のブロック図 Fig. 2. Block diagram of FF current control.

2・2 **FF** 電流制御によるトルク垂下 図2は、EV に搭載された直流電動機 (DCM) にフィードフォワード (FF) 電流制御を施したプロック図である。図においてそ 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。FF 制御では、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。ここでは、スリップによって変動す る $J(\lambda)$ に対して、 $\lambda = 0$ におけるノミナル慣性モーメン ト $J_n = J(0) = J_{\omega} + r^2 M$ を FF 制御器に用いている。

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、この逆起電力分の差が生じる。 ここで、モータパラメータが R, L, φ_f がノミナル値と等し ければ、電流 i は電流指令値 i^* から以下のように減少する。

$$i = i^{*} - \frac{1}{Ls + R} (v_{emf} - v_{emf}^{*})$$

= $i^{*} - \frac{\varphi_{f}^{2}}{Ls + R} \left(\frac{i}{J_{(\lambda)}s} - \frac{i^{*}}{J_{n}s} \right) \cdots \cdots \cdots \cdots (5)$

すなわち、FF 電流制御を施した際の電流 (トルク) は、ほぼ スリップが発生していない定常走行時 ($\lambda \simeq 0$) では、 $J_{(\lambda)} \simeq J_n$



図 3 FF+FB **電流制御のブロック**図

Fig. 3. Block diagram of FF+FB control.



Fig. 4. Experimental results of FF+FB control.

となるために指令通りのトルクが発生する。ところが一度 スリップが生じる ($\lambda \gg 0$) と、 $J_{(\lambda)} \ll J_n$ の関係から電流は 指令値より減少する。このように、スリップ率の増加に伴っ てトルクが垂下することで、スリップの抑制が達成される。

FF 電流制御によるトルク垂下特性とスリップ抑制につい ては、すでに実車実験によりその有効性を確認している^(®)。 従来のフィードバック(FB)電流制御では、スリップし始 めても指令値通りのトルクを出力することで、モータの回 転速度は急上昇する。一方、提案するFF制御では、スリッ プ発生時にはトルク垂下が起こり、速度上昇が抑制された。

3. トルク垂下の調整とスリップ抑制効果への影響

前章では、トルク垂下特性によるスリップ抑制効果について述べた。先のFF制御器では、トルク垂下の特性はモータ固有のパラメータで決まっていた。ここではFB制御器,外乱オブザーバ (DOB) による垂下特性の調整法を紹介する。さらにその実験により、トルク垂下速度の変化がスリップ抑制効果にどのような影響があるかを検討する。

3・1 FF+FB 制御によるトルク垂下調整 図 3 は FF 制御と FB 制御を組み合わせた FF+FB 制御のブ ロック図である。この制御では車輪が空転した際、FF 制 御器のトルク垂下効果と FB 制御器の指令追従性それぞれ の影響により、電流応答が決定される。FB 制御器 PI ゲイ ン K_p, K_i を変えることでトルク垂下効果を調整できる。

この制御について、一定トルク指令(電流指令値 100A) で加速中、滑りにくい路面(乾燥アスファルト)から滑りや すい路面(濡れたアクリル板)へ進入する実験を行った。路 面状態はおよそ t=3s で切り替わっている。図4 は $K_i = 0$ として Kp を $0 \sim 1$ の間で変化させた各実験結果である。 $K_i = 0$ の場合、電流の垂下は以下のようになる。



図5 FF+DOB 電流制御のブロック図 Fig. 5. Block diagram of FF+DOB control.



図 6 FF+DOB のスリップ実験結果 (K の調整) Fig. 6. Experimental results of FF+DOB control.

$$i = i^* - \frac{\varphi_f^2}{Ls + (K_p + R)} \left(\frac{i}{J_{(\lambda)}s} - \frac{i^*}{J_ns}\right) \cdots (6)$$

実際に実験結果を見ると、*K_p*を小さくするに従って、電流の垂下が速くなっているのが確認でき、電流垂下が速い ほど、スリップ率の急上昇を抑えるのが速くなっている。

3・2 **FF**+**DOB** 制御によるトルク垂下調整 図 5 は FF 制御に外乱オブザーバ (DOB) を組み合わせた FF+DOB 制御のブロック図である。これは、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。

FF+DOB について、先ほどと同様の定加速指令で走行 中に路面状態が変化する実験を行った。図 6 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。 τ は十分に小さいので、電流垂下は次のように 表すことができる。

$$i = i^* - \frac{\varphi_f^2(1-K)}{Ls+R} \left(\frac{i}{J_{(\lambda)}s} - \frac{i^*}{J_ns}\right) \quad \dots \dots \quad (7)$$

こちらも先の FF+FB 制御と同様に、ゲイン K が小さく なるにつれて、スリップ発生からの電流垂下が高速になり、 やはり電流垂下が速いほど、スリップ率も抑えられている。

3・3 トルク垂下の速さとスリップ抑制 図 4,6 の 結果より、どちらの場合でもトルク垂下が高速なほど、ス リップ抑制効果が優れていることが判る。一方で、ゲイン を上げ垂下速度を遅らせるにつれ、スリップ率上昇が落ち 着くまでには時間がかかり、結果的にスリップ率は高くなっ ている。これは、(4)式のようにスリップが生じると、イ ナーシャ $J_{(\lambda)}$ が軽くなり車輪速度が加速度的に上昇、これ によりさらにスリップ率が上昇、するとさらに $J_{(\lambda)}$ が減少 という悪循環に陥るからである。

そもそも、トルク垂下によるスリップ抑制制御は、スリッ プの発生を完全に防いだり、スリップ率を積極的に小さな 値に収束させるといったものではなく、電流を $i = \frac{J_{(\lambda)}}{J_n}i^*$ に収束させ、車輪速度の変動を $\frac{\omega}{T^*} \simeq \frac{1}{J_{ns}}$ へとノミナル化 することで、スリップ率上昇を遅らせるというのがその制 御効果である。よって、垂下が遅れたことで上昇した分の スリップ率については、路面状態が安定して再粘着するま で残ってしまう。

つまり、スリップ抑制効果を向上させるにはトルク垂下 を高速にすることが最も重要となる。しかし、先のように FB 制御器や DOB のゲインを高くすることは垂下速度を 低下させる。FF 制御のみの場合が、基本的にトルク垂下 が最も速くなるが、モータ固有パラメータで決まる垂下速 度が限界になってしまう。FF+DOB については K を負に することで、トルク垂下を積極的に速くできるが、これは パラメータ誤差の影響も増幅することになるので好ましく ない。そこで次節では、トルク垂下特性の dq 軸電流への 拡張に加えて、d 軸電流制御の改良により高速なトルク垂 下を実現する手法について提案する。

4. **IPMSM**の*dq* 軸電流を利用したトルク垂下特性

4・1 **IPMSM** でのトルク垂下の実現 ここでは IPMSM を用いたトルク垂下の実現について述べる。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。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + sL_d & -\omega_{re}L_q \\ \omega_{re}L_d & R + sL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{re}\varphi_f \end{bmatrix}$$
(8)
$$T = \{\varphi_f + (L_d - L_q)i_d\}i_q \quad \cdots \qquad (9)$$

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。(9)式のモータトルクは、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。

ここで、d 軸の電流制御を $i_d^* = 0$ 制御として、干渉成 分である $\omega_{re}L_q i_q, \omega_{re}L_d i_d$ を相殺すれば、IPMSM の q 軸 は DCM と同様に扱うことができ、図 2 のようなトルク 垂下によるスリップ抑制制御が実現できる。また、実際の IPMSM では最大トルク制御や弱め磁束制御によって、d 軸 電流は積極的に制御される。 $i_d^* \neq 0$ の場合には、d, q 軸を それぞれ次のように制御すればトルク垂下特性が得られる。

$$v_{d}^{*} = \frac{K_{pd}s + K_{id}}{s} (i_{d}^{*} - i_{d}) - \{\omega_{re}L_{q}i_{q}\} \dots \dots \dots \dots \dots (10)$$
$$v_{q}^{*} = (L_{qn}s + R_{n})i_{q}^{*} + \frac{T^{*}}{L_{s}}\varphi_{f} + \{\omega_{re}L_{d}i_{d}\} \dots \dots \dots (11)$$

{} 部分は非干渉制御である。先の DCM の場合には、FF 制御器の逆起電力補償分を $v_{emf}^* = \frac{\varphi_f^2}{J_n s} i^*$ で求めていたが、 これは、ノミナルモデルによる車輪回転速度 $\omega_n = \frac{\varphi_f i_q^*}{J_n s}$ と 逆起電力係数 φ_f の積である。つまり、IPMSM の場合に はノミナル速度が $\omega_n = \frac{T^*}{J_n s} = \frac{\{\varphi_f + (L_d - L_q) i_d^*\} i_q^*}{J_n s}$ となる。

最大トルク制御中のトルク垂下特性を確認するため、 先の実験のように、加速中に路面状態が変化するという シミュレーションを行った。IPMSM のパラメータが減 速比 6.267,極対数 6, L_q =2.25mH, L_d =1.93mH, φ_f = 0.02673Wb であり、トルク指令 100Nm による電流指令 値は $i_q^* = 68.25A$, $i_d^* = -38.25A$ となる。図7はその結果 で、IPMSM で最大トルク制御を行っている場合でもトル ク垂下が起こり、スリップが抑制されている。

4・2 d 軸電流を利用したトルク垂下の高速化 3.3 節で述べたように、トルク垂下速度が速くなればスリップ 抑制効果は向上する。ここでは dq 軸 双方の干渉成分を利 用してトルク垂下速度を向上させる手法について提案する。

$$i_d = \frac{1}{L_d s + R} \left\{ v_d^* + \omega_{re}(L_q i_q) \right\} \quad \dots \quad (12)$$
$$i_q = \frac{1}{L_q s + R} \left\{ v_q^* - \omega_{re}(L_d i_d + \varphi_f) \right\} \quad \dots \quad (13)$$

上式は、(8) 式をそれぞれ dq 軸電流 についてまとめた ものである。この式より、 L_{did} つまり i_d を大きくすれば、 i_q の垂下を速くできることがわかる。さらに、IPMSM は $L_d < L_q$ の逆突極モータであり、(9) 式からもわかるよう に i_d が正になるとトルクは減少することになる。よって、



Fig. 7. Torque pendency only by q-axis current.

スリップが発生した際に i_d を大きくすることができれば、 i_q の垂下速度を向上させるだけでなくリラクタンストルク 減少の効果もあり、トルク垂下の応答性向上に大きく寄与 すると考えられる。ここで、あらためて (12) 式を見直す と、 $\omega_{re}L_q i_q$ は i_d を増加させる方向に働いている。よって この項を利用すれば、q軸の垂下効果とは反対に、スリッ プが発生すると i_d が上昇する特性が実現できる。そこで、 dq 軸それぞれの干渉成分を利用したトルク垂下特性を持っ た電流制御を以下のように行う。

v_d^*	$= (L_{dn}s +$	$R_n)i_d^* -$	$\frac{T^*}{J_n s} \left(L_q i_q \right) \cdots \qquad \cdots$	(14)
v_q^*	$= (L_{qn}s +$	$R_n)i_q^* +$	$\frac{T^*}{L^*} \left(\varphi_f + L_d i_d \right) \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots $	(15)

これについて、先ほどと同様な条件で行ったシミュレーション結果を図9に示す。図7に比べて、トルク垂下は速くなっており、スリップ抑制効果をより向上している。dq軸電流を見ると、 i_d の上昇は i_q の下降よりも速くなっている。この理由は、モータパラメータが $L_q i_q > \varphi_f$ という条件だからである。ただし、d軸側も i_q の上昇により $\omega_{re}(L_d i_d + \varphi_f)$ が増加しているので、図7に比べると i_q の下降は鋭くなっている。



図8 dq 軸をともに利用したトルク垂下電流制御 Fig. 8. Current control of IPMSM.



図9 IPMSM のFルウ垂下シミュレーション (dq 軸電流によるトルク垂下)



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紹介した。

さらに、トルク垂下の速度を制御によって調整する実験 を行い、この結果よりトルク垂下速度が速いほどスリップ 抑制効果が向上することを確認した。

そして、IPMSM を用いた場合に *dq* 軸間の干渉成分を利 用することで、より高速なトルク垂下を起こす電流制御手 法を提案した。シミュレーションによって、*dq* 軸が互いに 干渉しながら素早いトルク垂下が起こることを確認した。

今後はパラメータ変動への対処といった課題も踏まえて、 実車実験によりその有効性を検討する。

文 献

- (1) JHFC 総合効率検討特別委員会 [(財) 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",日本機械学會論文集 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) 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).