

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

佐竹正光*, 河島清貴, 内田利之, 堀洋一 (東京大学)

Experiment on Skid Prevention for EVs based on the Torque Reduction Characteristic of Electric Motor
Masamitsu Satake*, Kiyotaka Kawashima, Toshiyuki Uchida, Yoichi Horii (University of Tokyo)

Abstract

In general, the motor installed in electric vehicle is given strong feedback current control, to output the torque according to the accelerator pedal. However the feedback controller promotes skid phenomenon, by keeping the torque the same as the instruction when skid occurs. In this paper, we design motor current controllers that have the torque reduction characteristic. The proposed skid prevention is achieved based on the torque reduction characteristic that the torque decreases when wheel skidding. Furthermore we introduce the adjustment method of torque reduction characteristic by adding feedback control or disturbance observer. In order to verify its effectiveness, the experimental results are shown.

キーワード：電気自動車, スリップ抑制, トルク垂下特性, フィードバック制御, フィードフォワード制御, 外乱オブザーバ (electric vehicle, skid prevention, torque reduction characteristic, feedback control, feedforward control, disturbance observer)

1. はじめに

世界中で環境問題が深刻化している中で、エネルギーの総合効率が高く CO₂ 削減にも効果的である⁽¹⁾ 車両として、電気自動車 (EV) が注目を浴びている。

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⁾⁽⁵⁾。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。

一般的に EV に搭載された電気モータには、アクセルペダル指令通りのトルクを出力するために強力な FeedBack (FB) 電流制御が施されている。しかし FB 制御の場合、スリップが発生しても指令通りのトルクを保とうとするため、スリップを助長してしまうことになる。本来、スリップを抑えるためにはスリップ発生時にトルクを減少させなくてはならない。そのため、FB 制御を前提としたこれまでの空転防止制御では、電流制御系の外側にスリップ抑制器を設け、スリップ発生時にはトルク (電流) 指令を減少させるような仕組みをとっていた。

これに対して、本研究では電流制御系そのものを改善し、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持たせ、スリップ抑制を実現している。さらには、FB 制御器や外乱オブザーバを付加することで、そのトルク垂下特性を調整する方法を紹介する。また、それぞれについてその有効性を確認するため、実車によるスリップ実験を行った。

2. 車両の 1 次元運動方程式

2.1 一輪モデル 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、車両の運動方程式は以下のように表現できる。

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

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

$$V_{\omega} = r\omega \dots\dots\dots (3)$$

各変数は、モータ回転速度 ω , 車体速度 V , 車輪速度 V_{ω} , モータトルク T_e , 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。

タイヤ-路面間の粘着特性はスリップ率の概念で表現する事ができる。スリップ率 λ は以下の式で定義される。

$$\lambda = \frac{V_{\omega} - V}{\max(V_{\omega}, V)} \dots\dots\dots (4)$$

また、駆動力 F_d は垂直抗力 N と摩擦係数 μ から次式で得られる。

$$F_d = \mu(\lambda)N \dots\dots\dots (5)$$

スリップ率 λ を用いると、タイヤ-路面間の摩擦係数 μ の関係 ($\mu - \lambda$ 曲線) は図 2 のように表される。摩擦係数つまり路面から車両への駆動力の伝達特性は一定ではなく、路面状態、すべり具合によって変化することを表している。

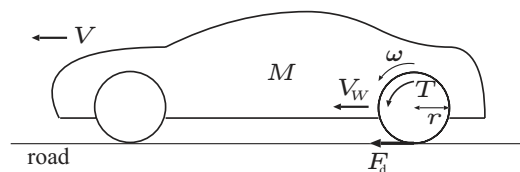


図 1 車両の運動

Fig. 1. The motion of vehicle.

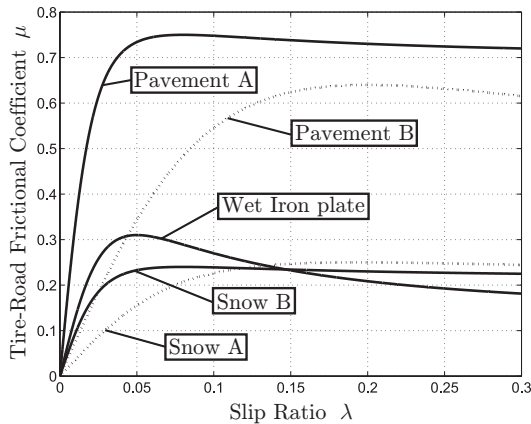


図2 各路面状態における $\mu - \lambda$ 曲線の一例

Fig.2. Behavior of $\mu - \lambda$ curves in different road conditions

2.2 慣性項への近似 式(1)~(4)をそれぞれ整理して、車両への入力をトルク T_e 、出力を車輪回転速度 ω とすると、モータから見た車両モデルの伝達関数 ω/T_e は次式で近似できる。

$$\frac{\omega}{T_e} \simeq \frac{1}{\{J_\omega + r^2 M(1 - \lambda)\}s} = \frac{1}{J(\lambda)s} \dots \dots \dots (6)$$

$$J(\lambda) = \{J_\omega + r^2 M(1 - \lambda)\}$$

$J(\lambda)$ 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、これはスリップ率の関数である。この式から、スリップ率が上昇すると $J(\lambda)$ が小さくなるのがわかる。したがってスリップという現象は、駆動側から見ると慣性の低減と捉えることができる。

3. トルク垂下特性によるスリップ抑制

先の考察より、モータから見た車両は、スリップ率により値が変化する慣性モデルと考えられるので、動力源であるモータに慣性モーメント $J(\lambda)$ の負荷を接続したのとして考える事ができる。EV に搭載された電気モータのブロックは図3のように表される。ここで、電圧入力 v^* から電流値 i までの伝達関数は次の $G(s)$ となる。

$$G(s) = \frac{i}{v^*} = \frac{1}{Ls + R + \frac{\varphi_f^2}{J(\lambda)s}} \dots \dots \dots (7)$$

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_{emf} は逆起電力を表す。

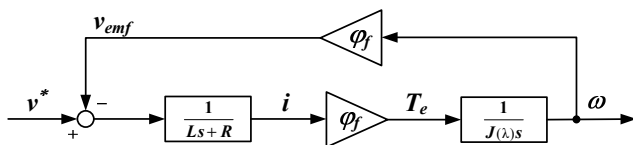


図3 電気モータのブロック図

Fig.3. The block diagram of electric motor installed in EV.

3.1 FB 電流制御 電気自動車に搭載された DCM に、従来手法である FB 電流制御を施したものが図4である。ここでは、PI 制御器を用いている。このときの電流指令値 i^* から実際の電流値 i までの伝達関数は次式となる。

$$G_{FB}(s) = \frac{i}{i^*} = \frac{K_p + K_i \frac{1}{s}}{Ls + (K_p + R) + (K_i + \frac{\varphi_f^2}{J(\lambda)}) \frac{1}{s}} \dots (8)$$

この FB 制御では、一般に K_p, K_i は大きく設定され電流(トルク)を常に指令値通りに保とうとする。そのため、先に説明したように車輪のスリップが生じ、慣性モーメント $J(\lambda)s$ が下がったような状態になっても、指令値通りに一定のトルクを発生させるように働く。トルク一定のまま慣性低下となると、車輪加速度増大によりモータ回転速度は急上昇し、結果さらなるスリップ率増加という悪循環に陥り、大空転を起こす。

3.2 FF 電流制御 一方、図5は FeedForward(FF) 電流制御の構成を示すものである。FF 電流制御では、電流指令値 i^* から電圧指令値 v^* を決定する制御器に $G(s)$ の逆関数 $G_n^{-1}(s)$ を用いる。ここで、ある時点における $J(\lambda)$ は不明であるが、非スリップ時の慣性項として $J_n = J_\omega + r^2 M$ を用いる。

$$G_n^{-1}(s) = \frac{v^*}{i^*} = Ls + R + \frac{\varphi_f^2}{J_n s} \dots \dots \dots (9)$$

これにより、図5における電流指令 i^* から実電流 i への伝達関数は、機械系時定数 $\tau_m = \frac{J(\lambda)R}{\varphi_f^2}, \tau_{mn} = \frac{J_n R}{\varphi_f^2}$ が電機系時定数 $\tau_e = \frac{L}{R}$ より十分大きいとして、定常時について考えると以下の特性が得られる。

$$\begin{aligned} G_{FF}(s) &= \frac{i}{i^*} = G(s) \cdot G_n^{-1}(s) = \frac{Ls + R + \frac{\varphi_f^2}{J_n s}}{Ls + R + \frac{\varphi_f^2}{J(\lambda)s}} \\ &\simeq \frac{(\frac{\varphi_f^2}{J_n s})(1 + \tau_e s)(1 + \tau_{mn} s)}{(\frac{\varphi_f^2}{J(\lambda)s})(1 + \tau_e s)(1 + \tau_m s)} \\ &\simeq \frac{J(\lambda)}{J_n} \frac{(1 + \tau_{mn} s)}{(1 + \tau_m s)} \simeq \frac{J(\lambda)}{J_n} \dots \dots \dots (10) \end{aligned}$$

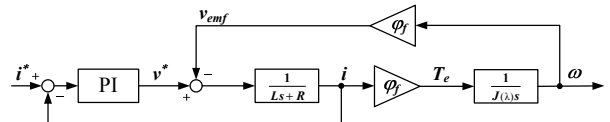


図4 FB 電流制御のブロック図

Fig.4. The block diagram of FB current control.

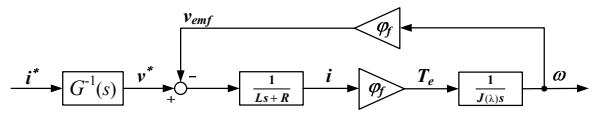
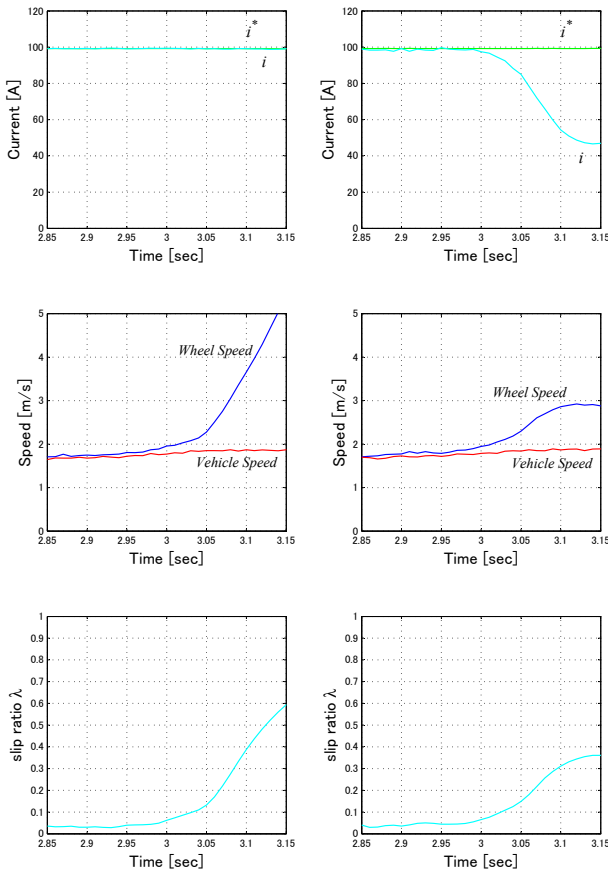


図5 FF 電流制御のブロック図

Fig.5. The block diagram of FF current control.

すなわち、FF 電流制御を施した際の電流 (トルク) は、ほぼすべりが発生していない定常走行時 ($\lambda \approx 0$) では、 $\frac{J(\lambda)}{J_n} \approx 1$ となるため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、 $\frac{J(\lambda)}{J_n} \ll 1$ の関係から電流は指令値より減少する。この急激な電流の減少がトルク垂下特性である。こうしてスリップ率増加に伴うトルク垂下により空転抑制が達成される。

3.3 実験結果 FB, FF 両制御法のこの提案手法の有効性を示すため実験を行った。一定トルク指令 (電流指令値で 100A) で加速中に、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。各実験では、およそ $t = 3s$ あたりより路面状態が切り替わっている。図 6(a) は従来手法による実験結果である。FB 電流制御がスリップ時にも指令値に基づいて常にトルク値を一定に保つため、モータ回転速度は急上昇している。これに対して、提案手法の実験結果を図 6(b) に示す。乾燥路面内では FB 制御に比べ若干の乱れがあるものの、ほぼ指令通りのトルクが得られている。しかし、滑りやすい路面に入りスリップが発生すると、スリップ率が大きくなるにつれ電流値が減少し、車輪側の急上昇は途中で落ち着いている。トルク垂下特性によりスリップが抑制されていることが確認できる。



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

図 6 FB 制御と FF 制御のスリップ実験結果

Fig. 6. Experimental results of FB control and FF control.

4. スリップ抑制効果の調整

前章では、空転時のトルク垂下特性により、スリップの抑制ができることがわかった。ここでは、トルク垂下特性に調整要素を持たせ、スリップ抑制効果を調整できることを示し、実験によりその効果を検証した。

4.1 FF+FB 制御によるトルク垂下の調整 先にあげた FF 電流制御, FB 電流制御を組み合わせた制御⁽⁵⁾ について考える。そのブロック図は図 7 のように表される。このときの i^* から i までの伝達関数は次式となる。

$$G_{FFFB}(s) = \frac{i}{i^*} = \frac{Ls^2 + (K_p + R)s + (K_i + \frac{\varphi_f^2}{J_n})}{Ls^2 + (K_p + R)s + (K_i + \frac{\varphi_f^2}{J(\lambda)})} \quad (11)$$

この式により、PI ゲインを変えてやると電流の垂下特性を調整できることがわかる。 K_p が垂下の速さ、 K_i が垂下の大きさを調整するパラメータとなる。

この制御について、先ほどの加速中に路面状況が変化する実験を行った。図 8 は $K_i = 0$ として K_p を 0~1 の間で変化させた時の実験結果である。 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る。電流垂下が速いほど、車輪速の上昇が抑えられスリップ率は小さな値に落ち着く。

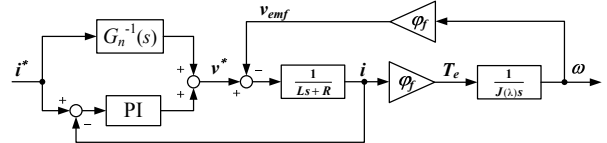


図 7 FF+FB 電流制御のブロック図

Fig. 7. The block diagram of FF+FB current control.

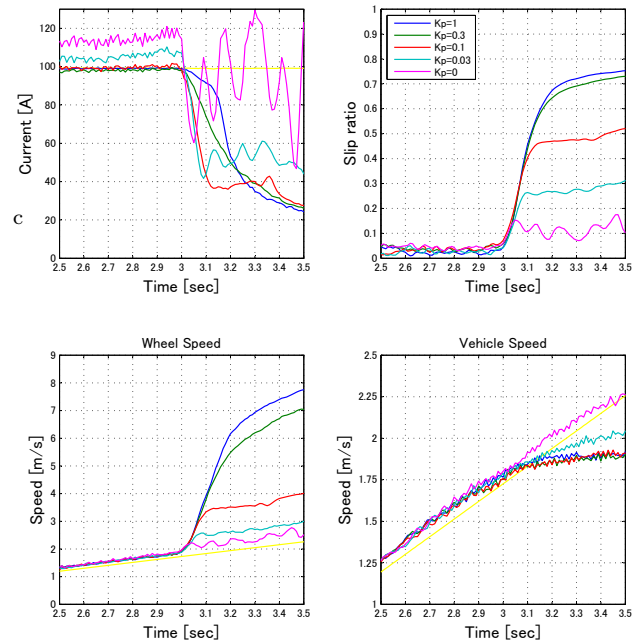


図 8 FF+FB のスリップ実験結果 (K_p の調整)

Fig. 8. Experimental results with tuning K_p of FF+FB control.

4.2 FF+DOBによるトルク垂下の調整 次に外乱オブザーバ (DOB) によりトルク垂下を調整する方法について説明する。こちらのブロック図は図9のようになる。これは、実際の逆起電力とFF入力電圧の逆起電力相当分の差を外乱オブザーバにより補償している。すると、式(12)が i^* から i までの伝達関数となる。

$$G_{FFDOB}(s) = \frac{i}{i^*} = \frac{L\tau s^3 + (L + R\tau)s^2 + (R + \frac{\varphi_f^2}{J_n^2}\tau)s + \frac{\varphi_f^2}{J_n^2}(1 - K)}{L\tau s^3 + (L + R\tau)s^2 + (R + \frac{\varphi_f^2}{J_n^2}\tau)s + \frac{\varphi_f^2}{J_n^2}(1 - K)} \quad (12)$$

この式から、 $K \neq 1$ の場合 K が垂下の速さ、 $K = 1$ の場合 τ が垂下の大きさを調整するパラメータになっている。

こちらについても先ほどと同様の実験結果を行った。図10は $\tau = 0.01$ で固定し、 K をパラメータとして変化した時の実験結果である。一方、 $K = 1$ で固定し、 τ を変化した実験結果を図11に示す。図10ではゲインが小さくなるにつれ電流の垂下が速くなっている。一方図11については、電流垂下だけを見るとパラメータ調整の効果を判別できそうにない。しかし、 i^* から ω までの特性、つまり車輪速度の傾きを見ると変化の傾向が表れている。

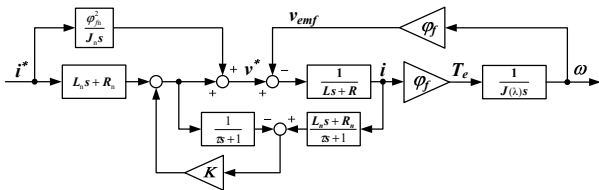


図9 FF+DOB 電流制御のブロック図

Fig. 9. The block diagram of FF+DOB current control.

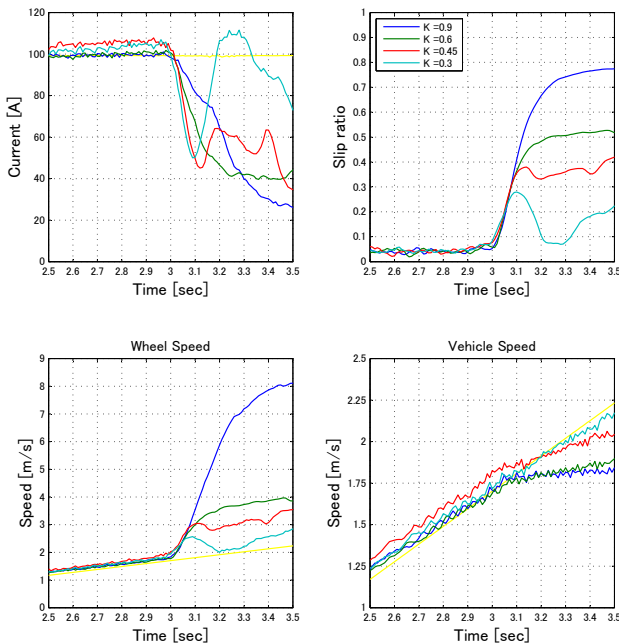


図10 DOBのスリップ実験結果 (K の調整)

Fig. 10. Experimental results with tuning K of FB+DOB control.

5. 結論

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、実験を行い、その有効性を示した。各パラメータ調整に対する電流垂下への効果は、シミュレーションやMGセット実験のようにはっきりと確認することはできなかった。しかし、車輪速度やスリップ率の応答には各パラメータ調整の傾向が表れた。図8,10では最終的な車輪速度の傾きはおよそノミナルモデル J_n から計算される加速度に落ち着いており、 K_p, K の両パラメータは加速度が落ち着く速さに影響している。一方で、図11では車輪速度の傾きはほぼ一定で、時定数 τ は車輪加速度の大きさに影響することが確認できる。これらにより、提案された手法がスリップ抑制効果の調整に有効であることが確認できた。

参考文献

- (1) 清水浩：“電気自動車のすべて”，日刊工業新聞社，(1992)
- (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) .

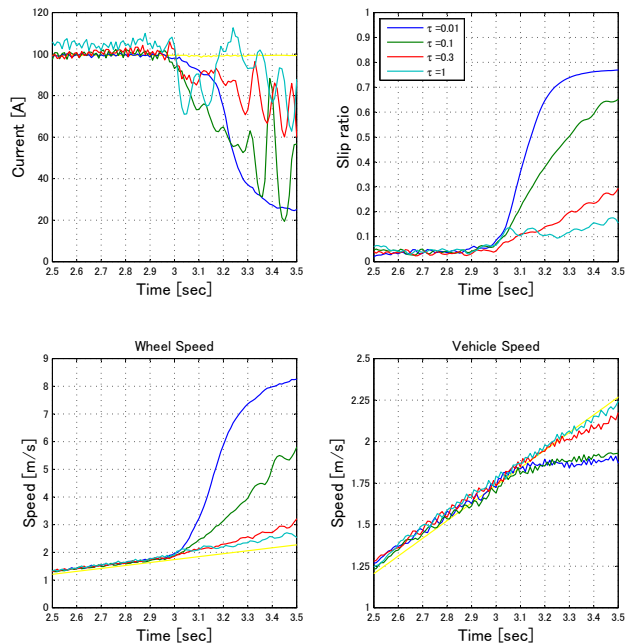


図11 DOBのスリップ実験結果 (τ の調整)

Fig. 11. Experimental results with tuning τ of FB+DOB control.