

直流分巻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

小玉 晋也*, 李 練兵, 堀 洋一 (東京大学)

Skid Prevention for EVs based on the Emulation of Torque Characteristics of Separately-wound DC Motor

Shinya Kodama, Lianbing Li and Yoichi Hori (University of Tokyo)

Abstract

It is well-known that the separately-wound DC motor has effective torque (current) reduction characteristics in response to rapid increase of the rotational speed of the motor. This characteristics has been utilized in adhesion control of electric locomotives with DC motor. In this paper, how to realize a new skid prevention method for EVs utilizing this characteristics is mentioned. In order to compensate for Back-EMF, disturbance observer is introduced. By selecting the time constant or observer gain properly, the torque (current) reduction characteristics can be adjusted freely in some range. The experimental results of the hardware skid simulator utilizing Motor-Generator setup verified the effectiveness of our proposed method.

キーワード: 電気自動車, スリップ抑制, 増粘着制御, 直流分巻モータ, トルク垂下特性

(Keywords: EV(Electric Vehicle), Skid Prevention, Adhesion Control, Separately-wound DC Motor, Torque Characteristics)

1 はじめに

近年, 電気自動車が環境問題やエネルギー問題の有効な解決策の一つとして注目されている。

電気自動車の利点は高性能, 低公害などがよく取り上げられるが, トルク応答が速く正確であるという電気モータの特徴を活かした, 電気自動車ならではの高性能なトラクションコントロールの実現に向けての研究はあまり行われていないというのが現状である⁽¹⁾⁽²⁾。

本稿では, 電気自動車の高速な応答性を活かす好例として, 直流分巻モータのトルク (電流) 垂下特性を用いた新しいスリップ抑制制御について検討する⁽³⁾⁽⁴⁾。

2 直流分巻モータのトルク (電流) 垂下特性に基づくスリップ抑制

〈2・1〉 車両の運動

本稿では, 路面状態が急激に変化した場合の直流分巻モータを用いた電気自動車の走行状態について, シミュレーションと実験を用いて検討する。

〈2・1・1〉 車両の運動方程式

モータの時定数は十分短く, 転がり抵抗と空気抵抗は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, 車両の運動方程式は式(1) - (3)で表される。

$$\omega = \frac{1}{J_s}(T - rF_d) \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{Ms}F_d \quad (2)$$

$$V_W = r\omega \quad (3)$$

式中の各変数は, 車輪 (モータ) の回転角速度 ω , 車体速度

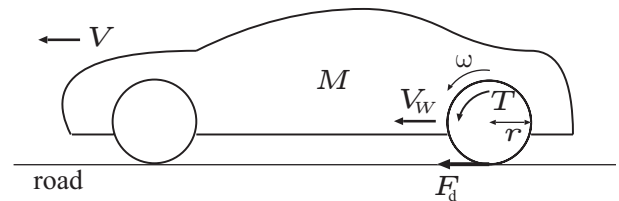


図1 車両の運動
Fig. 1. The motion of vehicle.

V , 車輪速度 V_W , 駆動力 F_d , モータの駆動トルク T , ラプラス演算子 s である。また, 各定数は, モータなどの総慣性モーメント J , タイヤ半径 r , 車体重量 M である。

式(1)は, 駆動輪の運動方程式であり, 車輪にはモータのトルクと路面から受ける駆動力の反力が働くことを示す。式(2)は, 車体の運動方程式である。

〈2・1・2〉 タイヤと路面間の増粘着特性

タイヤと路面間の増粘着特性は, スリップ率の概念を用いて表される。 V, V_W より, スリップ率 λ は, 式(4) - (5)で定義される。

$$\lambda = \frac{V_W - V}{V_W} \quad (\text{駆動時}) \quad (4)$$

$$\lambda = -\frac{V - V_W}{V} \quad (\text{制動時}) \quad (5)$$

スリップ率 λ を用いると, スリップ率とタイヤ-路面間の摩擦係数 μ との関係は, 例えば $\mu - \lambda$ 曲線 (関数) と呼ばれる式(6)で近似することができる。

$$\begin{aligned} \mu &= -1.05k\{\exp(-45\lambda) - \exp(-0.45\lambda)\} \quad (\text{駆動時}) \\ \mu &= 1.1k\{\exp(35\lambda) - \exp(0.35\lambda)\} \quad (\text{制動時}) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで, k は路面状態を表すパラメータであり, 例えば式(7)のように表される。

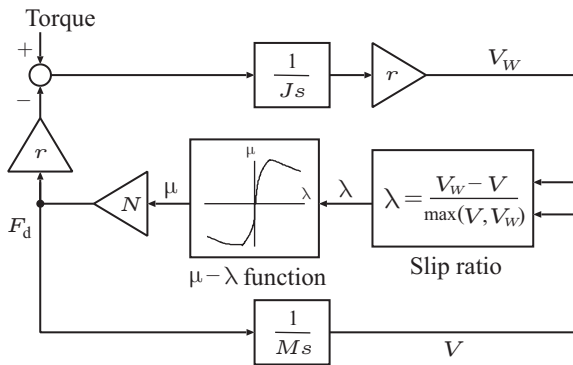


図2 車両の一輪モデル
Fig. 2. The block diagram of the one-wheel vehicle model.

$$\begin{aligned} k &= 1 \quad (\text{乾燥したアスファルト}) \quad \dots\dots\dots (7) \\ k &= 0.2 \quad (\text{雪道}) \end{aligned}$$

スリップ率 λ と $\mu - \lambda$ 曲線によって決定する摩擦係数 μ を式 (8) に代入すれば、駆動力 F_d が求まる。

$$F_d = \mu(\lambda)N \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 N はタイヤに働く垂直抗力である。以上より、車両の一輪モデルは図2となる。

〈2・2〉 逆起電力によるスリップ抑制の仕組み

直流分巻モータを搭載した電気自動車のブロック線図を図3(a)に示す。図中の G^{-1} は、電圧指令 v^* から実際のモータ電流 i までの伝達関数の逆関数であり、これによって実際のモータ電流は指令値を実現する。また、図中の車体モデルは図2に示した通りである。

自動車が走行している最中に、例えば乾燥したアスファルトから雪道に入るなどして路面が急に滑りやすくなった場合には、急激にタイヤ-路面間の摩擦が減少するので、仮にエンジンやモータがそれまでと同じトルクを出したならば、タイヤは大空転を起こすことが考えられる。

しかし、直流分巻モータのトルク（電流）垂下特性をうまく活かすことができれば、このようなスリップ現象（タイヤの大空転）を抑制することができる。車輪の速度が一旦は急激に上昇するが、車輪の回転速度に比例する逆起電力がトルクを低減させるため、車輪の急激な加速を抑制するためである。これが、直流分巻モータにおけるトルク（電流）垂下特性を活かしたスリップ抑制の仕組みである。

本手法の利点は、複雑な制御演算を必要としない上、高速にトルク（電流）を低減できるという点である。

図2と図3(a)に示す電気自動車の制御系モデルを用いてスリップ現象のシミュレーションを行った。計算条件は、開始時間を $t = 0[s]$ とし、 $t = 1[s]$ に滑りにくい路面で加速を開始し、 $t = 6[s]$ で滑りやすい路面に入るものとする。本モデルのパラメータには、我々の研究室で所有する実験用電気自動車「東大三月号Ⅰ」のものをを用いる。

結果を図3に示す。比較のために、強いフィードバック電流制御を行いモータ電流を一定にしている場合の結果も併記している。図3(b)の「with FF current control」の曲線を見ると、直流分巻モータがトルク垂下特性を持つことが分かる。その結果、図3(c) - 3(e)に示すようにスリップが抑制されて、タイヤの空転が抑えられている。

〈2・3〉 車両モデルの慣性項への近似

式 (1) - (4) から式 (9) が得られる⁽¹⁾。

$$\frac{\omega}{T} = \frac{1}{\{J + r^2 M(1 - \lambda)\}s} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式 (9) の分母を J_s とみなすと、トルクと車輪の回転速度の関係は簡単になる。走行中にスリップが発生すると、車輪の回転速度と車体速度の差は大きくなるため、スリップ率 λ が上昇する。ゆえに、スリップは J が減少する現象であるともみなすことができる。

本稿では、慣性モーメントが $1/3$ に減少する現象を電気自動車におけるスリップの発生とみなすことにする。第4章の実験では、駆動側モータから見た負荷側モータの慣性モーメントを $1/3$ に減少させる。次章以降、車体モデルを慣性項とする。

3 外乱オブザーバを用いたスリップ抑制制御の提案

前章では、直流分巻モータのトルク（電流）垂下特性によって、スリップが抑制できることが分かった。本章では、このトルク（電流）垂下特性の調整について考察する。

トルク（電流）垂下特性は、電気自動車の安全性や乗り心地などに影響を与える可能性があるため、垂下の強さや速さは自由に調整することが望まれる。しかし、一般にトルクの垂下の大きさは、モータのリアクタンス L などの物理定数によって決定するものである。そこで、電気自動車に一度搭載したモータを交換することなく垂下特性を調整するために、外乱オブザーバを用いた手法を提案する。

スリップ抑制制御のシミュレーションにはMGセット（第4章で詳しく述べる。）のパラメータを用いる。

〈3・1〉 時定数 τ によるトルク（電流）垂下特性の調整

〈3・1・1〉 時定数 τ による調整効果

直流分巻モータにおいて逆起電力を外乱とみなすと、外乱オブザーバを取り付けたブロック線図は図4(a)となる。既に述べたように、この図における車両モデルは慣性項 $1/J_s$ を意味する。

時定数 τ が十分に小さい場合、逆起電力は完全に補償され、外乱はモータ電流に影響しない。反対に、時定数 τ が大きい場合、外乱抑圧応答は遅くなり、結果として外乱の影響がモータ電流に現れる。従って、時定数 τ を調整することによって、モータ電流における逆起電力の影響を調整することが可能であることが分かる。

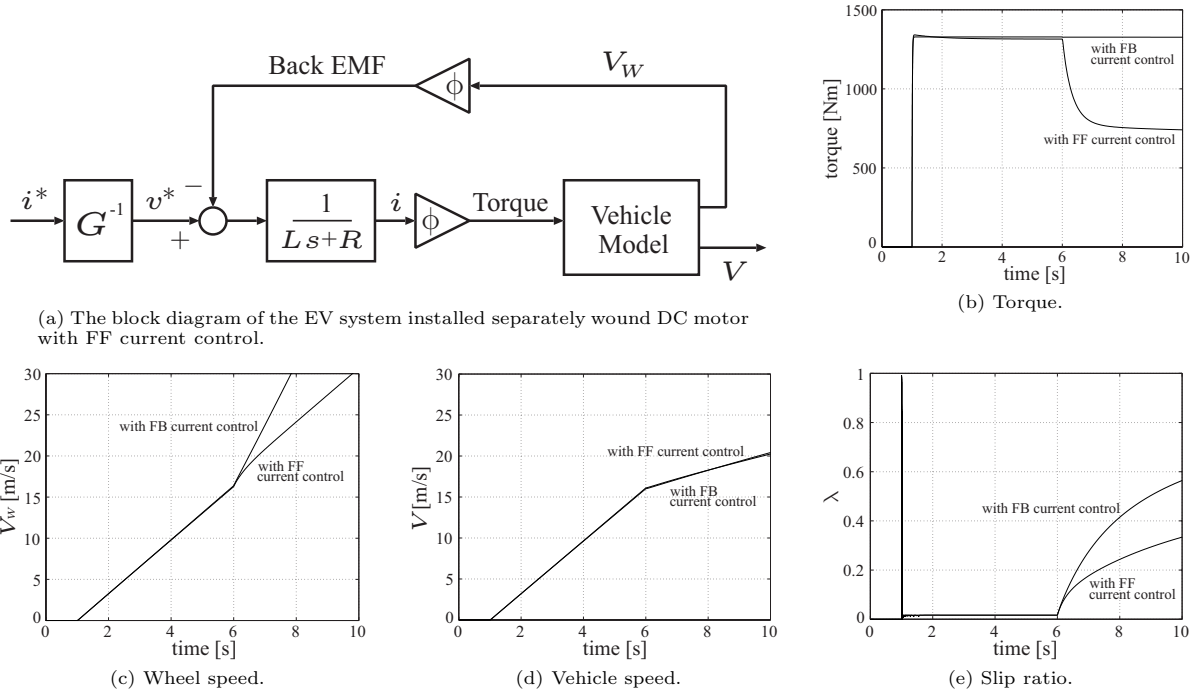


図3 電気自動車のブロック図と東大三月号Iのパラメータを用いたスリップ現象のシミュレーション結果

Fig. 3. The block diagram of the EV system and the simulation results of the skid phenomenon with utilizing parameters of EV (UOT March I). (The vehicle skids at $t = 6[s]$ in the simulation.)

〈3・1・2〉 シミュレーションによる解析

前項の考えに基づいて、補償ゲイン K を1として、時定数 τ を0.001から10まで変化させた時のシミュレーション結果を図4に示す。図4(b)をみると、時定数 τ がトルク（電流）垂下特性を変化させていることが分かる。

時定数 τ が大きくなるほど、スリップ発生時の電流の垂下も大きくなっている。その結果、図4(c)に示すようにモータの回転速度は急激な上昇を抑えられている。一方、時定数 τ が十分小さい場合、スリップ発生時に外乱である逆起電力は補償され、モータ電流は指令値と一致しモータの回転速度は急激に上昇する。

次に、時定数 τ によるトルク（電流）垂下特性の変化について定量的に検討する。

図4(a)における電圧指令 v^* から実際のモータ電流 i までの伝達関数は式(10)で表される。

$$G(s) = \left(\frac{i}{v^*} \right) = \frac{J_n \tau s^2 + J_n s}{J L \tau s^3 + J(L + R \tau) s^2 + (J R + \phi^2 \tau) s + \phi^2 (-K + 1)} \quad (10)$$

定常走行中は一定値である J を J_n とすると、 G^{-1} は式(11)となる。

$$G^{-1}(s) = \frac{J_n L \tau s^3 + J_n (L + R \tau) s^2 + (J_n R + \phi^2 \tau) s + \phi^2 (-K + 1)}{J_n \tau s^2 + J_n s} \quad (11)$$

式(10)及び式(11)を用いると、電流指令 i^* から実際のモータ電流 i までの伝達関数は式(12)で表される。

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

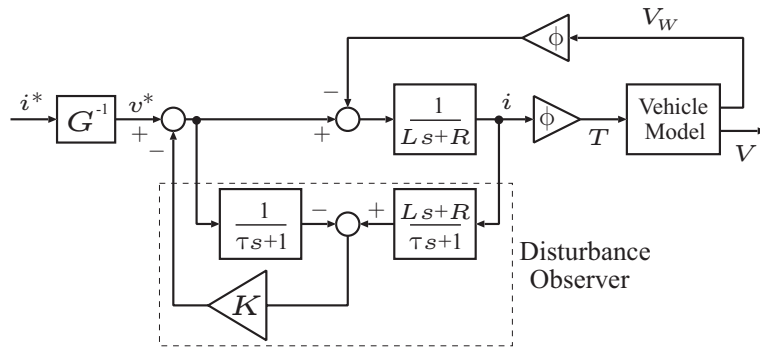
定常走行中は、 J と J_n が等しいため、式(12)の値は1である。つまり、定常走行中は任意の電流指令がそのままモータ電流となって制駆動が行われるため、運転者は思い通りに車両の前後方向の運動を操ることができる。

次に、スリップ発生時の車両の挙動を解析する。車輪が空転している時のモータからみた車輪の慣性は、定常走行中よりも軽くなる。ゆえにここでは、スリップ現象を慣性モーメント J が急激に減少する現象ととらえて解析する。補償ゲイン K を1とすると、式(12)におけるステップ応答の最終値は、式(13)で表される最終値の定理より式(14)となる。ここで、 $r(t)$ はステップ入力を意味する。

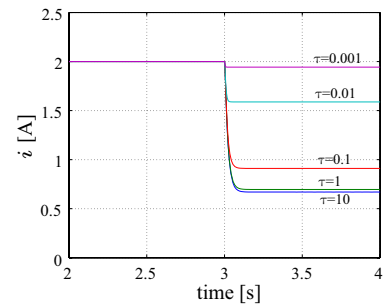
$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{i(t)}{i^*(t)} r(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{i(s)}{i^*(s)} \frac{1}{s} \dots \dots \dots (13)$$

$$= \frac{J_n R + \phi^2 \tau}{J R + \phi^2 \tau} \frac{J}{J_n} \dots \dots \dots (14)$$

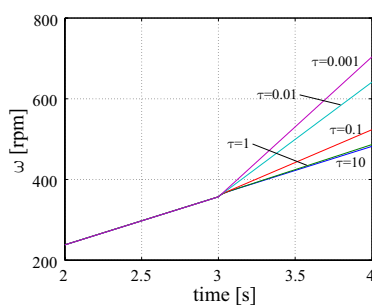
式(14)をみると、電流指令 i^* から実際のモータ電流 i までの伝達関数の慣性モーメント J の変化は時定数 τ に依存していることが分かる。時定数 τ が十分小さいと式(14)の値は常に1となり、電流指令がそのまま実際のモータ電流となるため、トルク（電流）垂下特性は現れない。反対に、時定数 τ が十分大きいと式(14)の値は J/J_n となり、モータ電流は電流指令の J/J_n となる。この急激な電流の減少こそがトルク（電



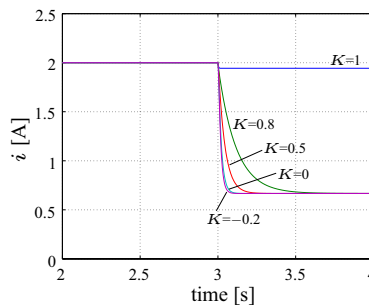
(a) The block diagram of the disturbance observer and the EV system installed separately wound DC motor with FF current control.



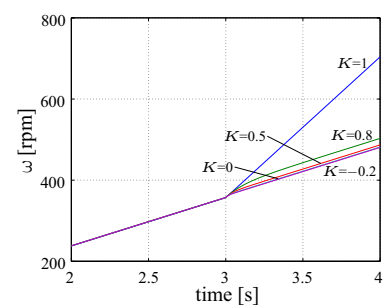
(b) The current of the motor. (The time constant τ is turned.)



(c) The rotational speed of the motor. (The time constant τ is turned.)



(d) The current of the motor. (The gain K is turned.)



(e) The rotational speed of the motor. (The gain K is turned.)

図4 外乱オブザーバのブロック図と MG セットのパラメータを用いたシミュレーション結果

Fig. 4. The block diagram of the disturbance observer and the simulation results of the skid phenomenon with utilizing parameters of MG setup. (The current command $i^* = 2[\text{A}]$, the motor skids at $t = 3[\text{s}]$ in the simulation.)

流) 垂下特性と呼ばれる現象である。

以上より、時定数 τ によってスリップの発生時にトルク（電流）垂下特性は自由に調整できることが分かった。また、本手法の問題点として、トルク（電流）が垂下するには多少の時間がかかるということが挙げられる。つまり、たとえ時定数 τ が十分大きくとも図 4(c) のように、モータの回転速度が一旦急激に上昇してしまうのである。

〈3・2〉 ゲイン K によるトルク（電流）垂下特性の調整

〈3・2・1〉 ゲイン K による調整効果

提案手法では、トルクが垂下するまでに多少の時間がかかるという問題点を踏まえて、ゲイン K によるトルク（電流）垂下特性の調節について考察する。ゲインを $K = 1$ に固定した場合、式 (12) は 2 次遅れ系である。しかし、ゲインが $K \neq 1$ の場合、式 (12) は 3 次遅れ系となり、特性方程式は複雑になる。ラオスの安定判別法より、 K が式 (15) を満たす時、特性方程式は安定である。

$$1 - \frac{(L + R\tau)(JR + \phi^2\tau)}{L\tau\phi^2} < K < 1 \dots\dots\dots (15)$$

よって、ゲイン K が式 (15) を満たす時のみゲイン K を変化させることで式 (12) の応答時間を自由に調整することが可

能となる。すなわち、ゲイン K を調整することによって応答時間の遅れを小さくすることが可能である。

〈3・2・2〉 シミュレーションによる解析

時定数 τ を $\tau = 0.001$ として、ゲイン K を 1 から負の方向に大きくしていった場合に、スリップ発生時のトルク（電流）垂下特性をシミュレーションした結果を図 4 に示す。

図 4(d) より、ゲイン K を負の方向に大きくするにつれてスリップ発生時のトルク（電流）の垂下が速くなることが分かる。また、図 4(e) より、 K が負の方向に大きいほどモータの回転速度は急激な上昇を抑えられている。

以上より、スリップ発生時のトルクの最終値は外乱オブザーバの時定数によって決定し、トルク（電流）の垂下の速さはゲインによって決定することが分かる。直流分巻モータの持つスリップ抑制機能を効果的に利用するためには、目的に合わせて時定数とゲインの最適な組み合わせを検討してトルク（電流）垂下特性を決める必要がある。

4 MG セットによるスリップ抑制制御の実験

〈4・1〉 実験の概要

図 5 に MG セット、図 6 にその制御系の全体像を示す。駆動側と負荷側の 2 つのモータのシャフトを連結させた実験装置

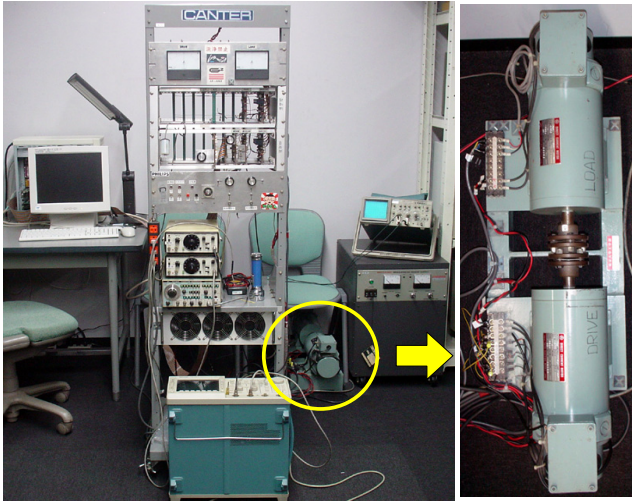


図 5 MG セット
Fig. 5. Motor-Generator setup.

である MG セットを用いて、スリップ発生時のトルク（電流）の垂下の様子と外乱オブザーバによってトルク垂下特性が調節される様子を観察する。

負荷側モータはハードウェアコントローラのみによって制御され、駆動側から見た負荷側モータの慣性モーメントを制御することができる。駆動側モータはハードウェアコントローラとソフトウェアコントローラからなり、PI 制御器及びドライバなどはハードウェアコントローラ、外乱オブザーバ及び G^{-1} フィルタはソフトウェアコントローラで構成される。DA、AD、カウンタボードは両コントローラ間のやりとりをする。ソフトウェアコントローラのサンプリング時間は $1[\text{ms}]$ であり、電流指令は $i^* = 2[\text{A}]$ 、車両のスリップを意味する慣性モーメントの急激な減少は $t = 3[\text{s}]$ 付近で生じる。

〈4・2〉 トルク（電流）垂下特性の確認

第 2 章で示したトルク（電流）垂下特性を確認するための実験を行った。直流分巻モータに図 3(a) に示したプレフィルタ G^{-1} を付けただけの場合と強いフィードバック電流制御を行っている場合との両方で、加速中にスリップを発生させた時のモータ電流及び回転速度を観察した。結果を図 7 に示す。

スリップ現象を模擬するモータの慣性モーメントは $t = 3[\text{s}]$ 付近で急激に減少する。プレフィルタを付けただけの場合に、慣性モーメントが減少した時のモータ電流が減少している様子を図 7(a) に示す。これがトルク（電流）垂下特性であり、図 7(b) に示すようにモータの回転速度は急激な上昇を抑制されている。これに対して、強いフィードバック電流制御を用いる場合は、慣性モーメントが減少してもモータ電流が一定に保たれるので、モータの回転速度は急激に上昇していることが分かる。

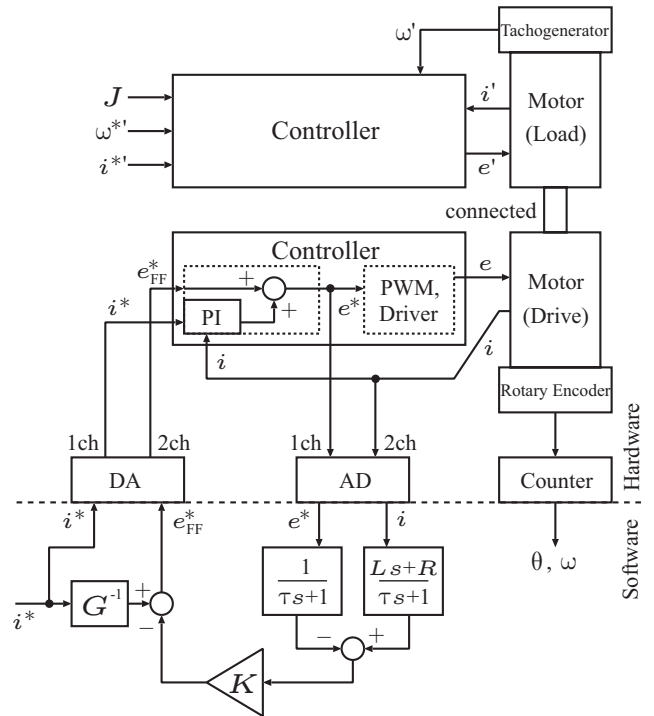


図 6 MG セット制御系のブロック図

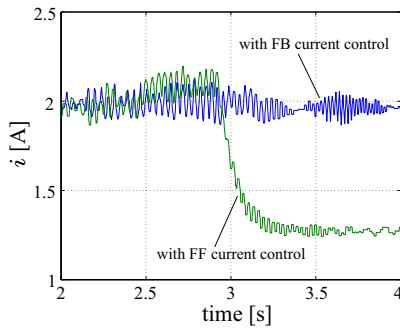
Fig. 6. The block diagram of the control system of MG setup. (The PI controller is not utilized when the FF current controller is utilized.)

〈4・3〉 外乱オブザーバを用いたトルク（電流）垂下特性の調整

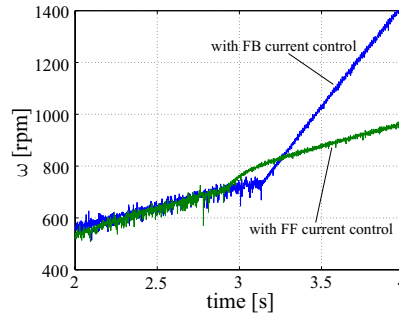
次に、外乱オブザーバを用いてトルク（電流）垂下特性を調整する実験を行った。外乱オブザーバのゲインを $K = 1$ に固定して時定数 τ を 0.001 から 10 まで 5 通りに変化させた。それぞれの実験結果を図 7 に示す。図 7(c) から時定数 τ が大きいほど電流の垂下が大きくなっていることが分かる。その結果、図 7(d) のように、モータの回転速度は急激な上昇を抑えられている。

最後に、外乱オブザーバの時定数を $\tau = 0.001$ に固定してゲイン K を変化させた時の実験結果を図 7 に示す。図 7(e) からゲイン K が負方向に大きいほどトルク（電流）は急激に減少していることが分かる。その結果、図 7(f) のように、ゲインが負方向に大きいほど慣性モーメントが減少した後のモータの回転速度は急激な上昇を抑えられている。これらの実験結果はシミュレーション結果とほぼ一致している。

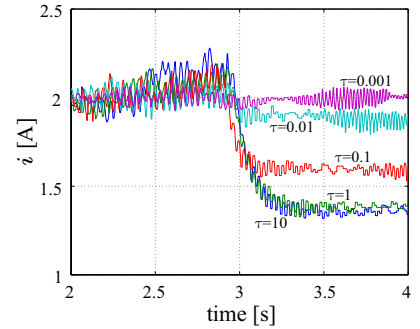
以上の実験結果から外乱オブザーバの時定数及びゲインを変化させることによって、直流分巻モータにおけるトルク（電流）垂下特性は自由に調整可能であることが実証された。提案手法が電気自動車におけるスリップを完全に抑制できるものではないが、モータが本来持つ特性を活かしているため、非常に応答が高速であることは大きな利点となりうる。それゆえ、提



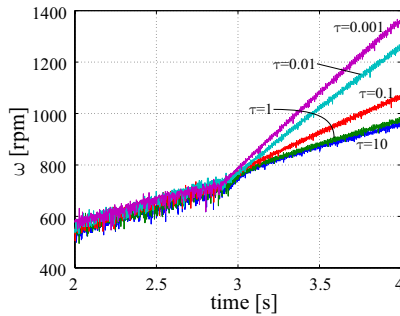
(a) The current of the motor reduces only when it is controlled with FF current controller.



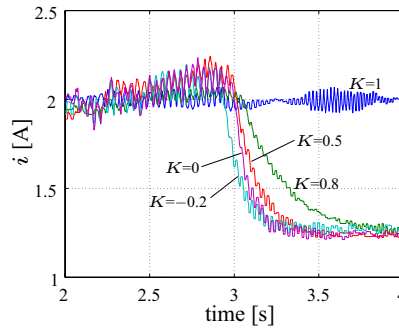
(b) The rotational speed of the motor is prevented from rapid increase only when it is controlled with FF current controller.



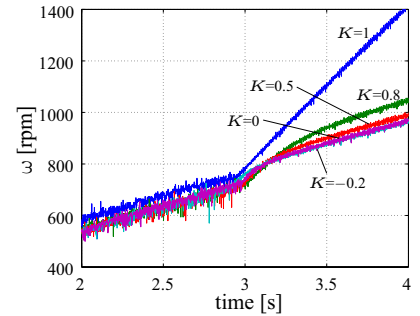
(c) The current of the motor reduces when the time constant τ is turned.



(d) The rotational speed of the motor is prevented from rapid increase when the time constant τ is turned.



(e) The current of the motor reduces when the gain K is turned.



(f) The rotational speed of the motor is prevented from rapid increase when the gain K is turned.

図 7 MG セットを用いたスリップ抑制制御の実験結果

Fig. 7. The experimental results of the skid phenomenon with utilizing MG setup. (The torque (current) reduction characteristics can be confirmed. The current command $i^* = 2[A]$, the motor skids at about $t = 3[s]$.)

案手法を他のモータ制御手法と組み合わせることによって、電気自動車のスリップ抑制にさらなる効果を発揮する可能性がある。

5 む す び

増粘着制御の原理は、車輪が小さなスリップを起こした時、ミクロな時間スケールでは大きなトルク（電流）垂下特性を示すが、マクロな時間スケールでは定められたトルクを出力する特性を示すものになればよい。この特性は電圧源で駆動される直流分巻モータの特性そのものであり、鉄道では主として私鉄車両を中心に広く用いられてきた。現在電気自動車に好んで用いられるのは永久磁石を使った交流モータであり、はじめから高性能な電流制御が施される。しかしながら、この電流制御は粘着性能の点では最悪であることは意外に知られておらず、既存の諸手法も電流制御を前提としている。

本稿では、トルク（電流）垂下特性に着目した電気自動車におけるスリップ抑制制御手法を提案した。これはすなわち、スリップ抑制における大きな可能性が見出されたと言っても過言ではない。現在、本手法を実現するために、電圧駆動型 BLDC

モータによる新しい電気自動車を製作中である。

本研究の成果が広く用いられるようになれば、スリップなどの危険性が格段に少なくなることはもちろん、滑りやすい路面でも高度な姿勢制御によって自動車運転の安全性向上に大いに貢献できる。また、より損失の少ないタイヤを用いることによって、電気自動車の大きな問題であるエネルギー効率を、飛躍的に伸張できると考えられる。

文 献

- (1) Y. Hori, "Traction Control of Electric Vehicle: Basic Experimental Results Using the Test EV UOT Electric March," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, Vol. 34, No. 5, pp.1131–1138, 1998.
- (2) S. Matsugaura, et al., "Evaluation of Performances for the In-Wheel Drive System for the New Concept Electric Vehicle KAZ," in *Proc. EVS19*, Pusan, Korea, 2002.
- (3) T. Miyamoto and Y. Hori, "Adhesion Control of EV Based on Disturbance Observer," *IEE of Japan Technical Meeting Record, IIC-00-9*, pp.49–54, 2000. [In Japanese]
- (4) S. Kodama, L. Li and Y. Hori, "Skid Prevention for EVs based on the Emulation of Torque Characteristics of Separately-wound DC Motor," in *Proc. IEEE AMC*, Kawasaki, Japan, 2004.