

# 2118 動輪のすべり加速度に基づいた再粘着制御

学 [電] ○寺本 晃大 正 [電・機] 大石 潔 (長岡技術科学大学)

正 [電・機] 牧島 信吾 上園 恵一 (東洋電機製造)

正 [電] 保川 忍 (元東洋電機製造)

## Re-adhesion Control Based on Wheel Slip Acceleration

Kota Teramoto Kiyoshi OHISHI, Nagaoka Univ. of Tech. 1603-1, Kamitomioka-cho, Nagaoka City

Shingo MAKISHIMA Keiichi UEZONO, Toyo Denki Seizo K.K.

Shinobu YASUKAWA, Former Engineer of Toyo Denki Seizo K.K.

J-RAIL2012 We have already proposed the anti-slip/skid re-adhesion control based on disturbance observer and sensor-less vector control. When the control system detects the slip/skid phenomenon, the system generates torque command to decrease the slip/skid velocity, but the system requires a lot of tuning control parameters and running test. This paper proposes a new method of generating torque command for anti-slip/skid re-adhesion control based on slip/skid acceleration. This paper shows that the proposed anti-slip/skid re-adhesion control gets fine performance by the test bench.

*Keywords* : electric train, anti-slip/skid re-adhesion control, disturbance observer, slip/skid acceleration

### 1. はじめに

電車における粘着制御では空転検出後、電動機のトルクに対して一定の比率であったり、接線力推定に基づいたりして、主電動機の発生トルクを下げる方法が広く用いられている。筆者らは、これまでに速度センサレスベクトル制御と外乱オブザーバによる接線力推定に基づいた電車の空転再粘着制御を提案してきた<sup>[1][2]</sup>。提案された制御方式は、実際の通勤電車において良好な駆動性能が実証されている<sup>[3]</sup>。しかし、これらの手法では空転検出閾値やトルク引き下げ量といった粘着制御の調整パラメータが設定されており、最大限粘着力を有効利用できるようにするためには、試行錯誤的な調整と多くの走行試験が必要となる。

そこで筆者らは、解析的にトルクの引き下げ量を決める方法として、外乱オブザーバによる接線力の推定値を積極的に使用したトルクの引き下げ量の計算法を提案している<sup>[4][5]</sup>。さらに、1/750 スケールの等価実験システムを用いて力行時における空転再粘着制御実験を行い、提案法を用いることで高い粘着力利用率が得られることを示した<sup>[6]</sup>。本稿では、実際の運行条件を考慮し、力行・惰行・制動を連続的に動作させる条件で実験を行い、提案法の有用性を示す。

### 2. 空転・滑走再粘着制御系の構成

#### 2.1 電車における空転・滑走現象

図1に電動車1両・付随車1両編成電車の模式図を示す。編成電車には電動車と付随車が存在し、電動車にのみ主電動機が取り付けられている。主電動機の出トルクは車輪・レール間の粘着力を利用してレールに伝えられることで、電車が加減速できる。

ここで、図2に列車速度、空転速度に対する粘着特性を示す。なお、図中の縦軸は、静止時の粘着係数である

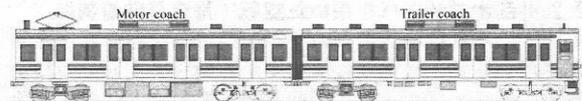


Fig.1 Two coach train

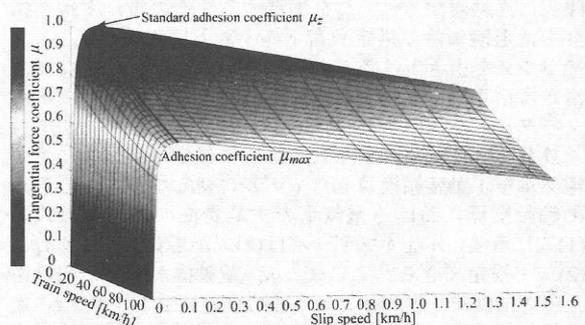


Fig.2 Characteristics of adhesion coefficient

基準粘着係数 $\mu_z$ で正規化している。接線力係数 $\mu$ はあるすべり速度で最大となり、この時の接線力係数を粘着係数 $\mu_{max}$ という。この粘着係数は走行速度が上がるにつれて小さくなる性質を想定している。主電動機からの出力トルクを大きくすると、すべり速度が増大することで接線力係数が大きくなり、駆動トルクがレールに伝達される。しかし、すべり速度がある点を超えると、逆に接線力係数が低下するため、動輪の空転現象が発生する。

また、制動時においては、図2を滑走速度に対する負の接線力係数として扱うことができる。主電動機から出力される制動トルクを大きくすると、すべり速度が増大することで接線力係数が大きくなり、制動トルクがレールに伝達される。しかし、すべり速度がある点を超えると、逆に接線力係数が低下するため、動輪の滑走現象が

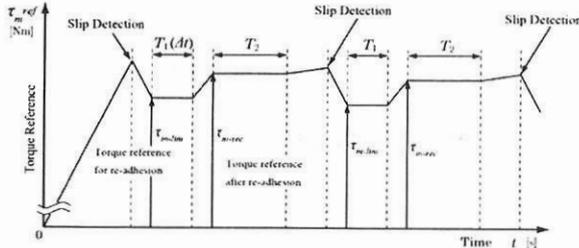


Fig.3 Torque command pattern of anti-slip re-adhesion control

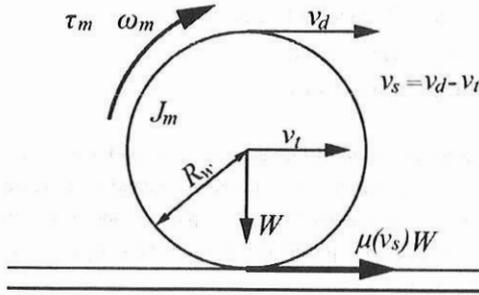


Fig.4 One wheel model

発生する。このように、力行時と制動時では、接線力係数を対称なモデルとして扱うことができる<sup>13)</sup>。

## 2.2 外乱オブザーバを用いた空転・滑走再粘着制御

図3に空転再粘着制御のアルゴリズムを示す。推定回転速度から得られた動輪加速度から動輪の空転を検知すると、外乱オブザーバによって空転検知時の動輪の負荷トルク $\tau_L$ を推定し、推定負荷トルク $\hat{\tau}_L$ に基づいた動輪が確実に再粘着する $\tau_{m-lim}$ を決定する。その後、トルク指令を滑走検知時の推定負荷トルク $\hat{\tau}_L$ と同程度の $\tau_{m-rec}$ までトルクを引き上げることで再粘着制御を行う。なお、滑走再粘着制御に関しては、駆動トルクを負としたトルクパターンを用いる。

外乱オブザーバによる負荷トルク推定は、図4に示す電気を1動輪軸換算したモデルに対して行っている。1動輪軸換算における電車の主電動機の運動方程式を(1)式に示す。外乱オブザーバは(1)式から負荷トルク $\tau_L$ を(2)式で推定できる。ここで、 $J_m$ :電動機から見た駆動系全体の慣性モーメント、 $\tau_m$ :電動機の発生トルク、 $\tau_L$ :電動機の負荷トルク、 $\omega_m$ :電動機の角速度、 $\mu(v_s)$ :接線力係数、 $v_s$ :動輪のすべり速度、 $W$ :軸重、 $R_w$ :動輪半径、 $R_g$ :歯車比、 $g$ :重力加速度、 $a$ :外乱オブザーバの極、 $s$ :ラプラス演算子を表す。本論文での外乱オブザーバの極は $a=100[\text{rad/s}]$ としている。

$$J_m \frac{d}{dt} \omega_m = \tau_m - \tau_L \quad (1)$$

$$\hat{\tau}_L = \frac{a}{s+a} (\tau_m - J_m s \omega_m) \quad (2)$$

$$\tau_L = \frac{1}{R_g} \mu(v_s) W g R_w \quad (3)$$

なお、 $\tau_{m-lim}$ 及び $\tau_{m-rec}$ は(4)式(5)式によって決定される。式中の $\alpha$ 及び $\beta$ は $\hat{\tau}_L$ に対する補正ゲインであり、再粘着制御によって粘着力を有効利用するためには、これらのパラメータの試行錯誤的な調整が必要となる。

$$\tau_{m-lim} = \beta \hat{\tau}_L \quad (4)$$

$$\tau_{m-rec} = \alpha \hat{\tau}_L \quad (5)$$

## 2.3 すべり加速度を用いた空転・滑走再粘着制御

粘着制御では、空転検知後に主電動機の発生トルクを引き下げることが広く用いられている。これは、主電動機のトルクを引き下げることで動輪周加速度が減少し、すべり加速度 $\dot{v}_s$ が負方向を向くことにより、すべり速度が減少し、接線力係数が空転領域から粘着領域へ遷移するためである。図4の1動輪モデルに基づいて(1)式を(6)式に示すように変形すると、空転検知後のすべり速度の増大を抑制するためには、すべり加速度が負となればよいので、発生トルクは(7)式で表される範囲とする必要がある。

$$\tau_m = \tau_L + J_m \frac{R_g}{3.6R_w} (\dot{v}_t + \dot{v}_s) \quad (6)$$

$$\tau_m < \tau_L + J_m \frac{R_g}{3.6R_w} \dot{v}_t \quad (7)$$

負荷トルク $\tau_L$ と車両加速度 $\dot{v}_t$ が把握できるとすれば、すべり加速度を指令値として与えることで、(7)式を満たすトルクの指令値を(8)式のように計算することができる。

$$\tau_{m-lim} = \hat{\tau}_L + J_m \frac{R_g}{3.6R_w} (\hat{v}_t + \dot{v}_s^{ref}) \quad (8)$$

(8)式は、空転によるすべり速度の増大を抑えるために十分なトルクの引き下げ量 $\tau_{m-lim}$ をすべり加速度指令 $\dot{v}_s^{ref}$ の値によって、任意に決定できることを示している。次に図3のトルク指令パターンに基づいて粘着制御を行うことを考える。空転領域における接線力を図5のように近似して、負荷トルクの変化率 $\tau_{Ls}$ を求め、空転を検出した瞬間のすべり速度を $v_{s0}$ とすると、トルクを引き下げている間のすべり速度の変化は(9)式ようになる。

$$v_s(t) = v_{s0} + \frac{K}{\tau_{Ls}} \dot{v}_s^{ref} \left(1 - e^{-\frac{\tau_{Ls}}{K} t}\right) \quad (9)$$

$$K = J_m \frac{R_g}{3.6R_w} \quad (10)$$

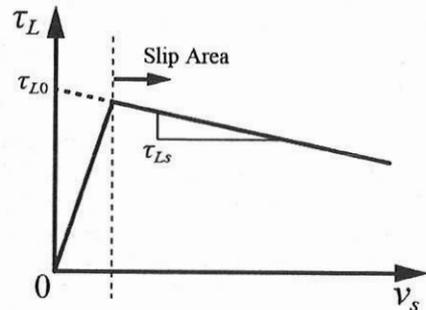


Fig.5 Linear approximation of tangential force

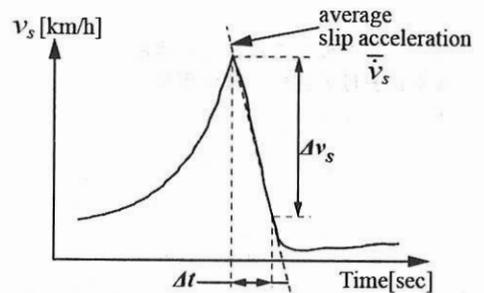


Fig.6 Average slip acceleration



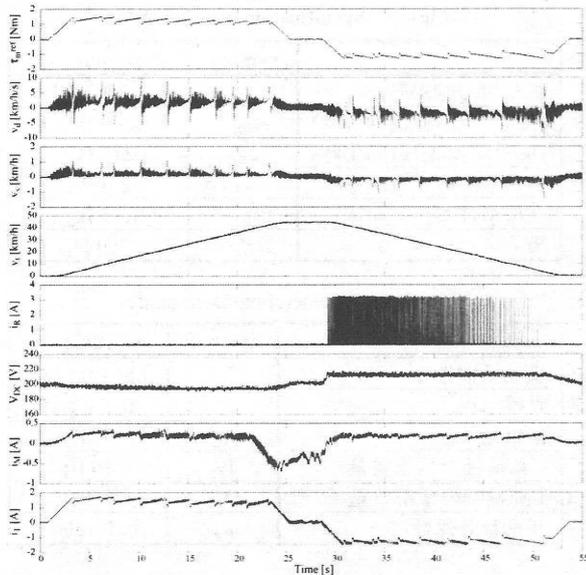


Fig.8 Experimental result of conventional method

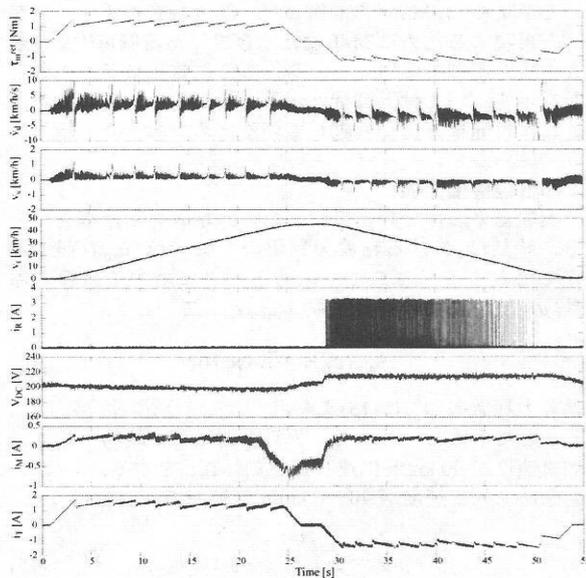


Fig.9 Experimental result of proposed method

なお、結果の波形は上から主電動機を模擬している IPMSM の出力トルク、動輪周加速度、すべり速度、列車速度、ブレーキ抵抗電流、DC リンク電圧、M 軸実電流、T 軸実電流を示している。まず、図 8 を例に動作を説明する。25 s までは力行するために正のトルクを出力し、空転現象が発生すると動輪加速度が急上昇するため、図 5 のパターンに従って空転再粘着制御が行われている。そして、約 3 s 間惰行した後、回生動作に移行して滑走再粘着制御が行われている。力行時には動輪が空回りするために正のすべり速度が生じるが、制動時には動輪がロックするために負のすべり速度が生じる。また、回生動作による DC リンク電圧の上昇を抑えるためにブレーキチョップが動作し、ブレーキ抵抗に電流が流れている。

図 8 と図 9 を比較すると、いずれの実験結果でも空転・滑走が発生した瞬間のすべり速度が 1 km/h 程度に抑えられている。ここで、従来法と提案法の粘着力利用率を表 5 に示す。いずれの条件下でも 93 % 程度の高い粘着力

Table5 Adhesion force utilization ratio

	Acceleration [%]	Deceleration [%]
Conventional method	93.1	93.2
Proposed method	93.1	93.4

利用率が得られており、良好な再粘着制御が行われていると言える。従来法と提案法では制御パラメータの決定法に違いがあり、従来法では無次元量のパラメータを試行錯誤的に決定する必要がある。また、高い粘着力利用率を得るためには力行時と回生時でパラメータを独立に決定する必要がある。これは、力行時は粘着係数が小さくなっていくが、制動時は粘着係数が大きくなっていくのでトルクの引き上げ量を大きくできるためである。それに対して、提案法ではパラメータを理論的に決定でき、力行時と制動時で同等のパラメータを用いても高い粘着力利用率が得られている。

#### 4. まとめ

本稿では、すべり加速度に基づくトルク引き下げ量の計算法を示し、力行・惰行・制動電車モデルへの適用検討を行った。実験機を用いて、力行・惰行・制動を連続的に動作させる条件で実験を行い、提案法と従来法のいずれの手法を用いても 93% 程度の高い粘着力利用率が得られることを確認できた。以上のように提案法を用いることで、試行錯誤的な調整を必要とせず、粘着制御の特徴を決めることができるようになり、また空転・滑走検出時のすべり速度を見積もることが出来れば、空転・滑走検出後、確実に動輪を再粘着させることができるようになり、提案法の有用性を確認できた。

#### 参考文献

- 1) 佐野孝：交通用センサレス速度制御システム，東洋電機技報，No.109，pp.14-23，2003
- 2) 門脇悟志，大石潔，宮下一郎，保川忍：外乱オブザーバと速度センサレスベクトル制御による電気車(2MIC)の空転再粘着制御の方式，電気学会産業応用部門論文誌，Vol.121，No.11，pp.1192-1198，2001
- 3) 門脇悟志，畑正，廣瀬寛，大石潔，飯田哲志，高木正志，佐野孝，保川忍：速度センサレスベクトル制御・外乱オブザーバによる空転再粘着制御の実車両への適用とその評価 -205 系 5000 番代電車における実例-，電気学会産業応用部門論文誌，Vol.124，No.9，pp.906-916，2004
- 4) 佐藤正健，大石潔，牧島信吾，上園恵一，保川忍：すべり加速度に着目した空転再粘着制御法の一検討，電気学会 交通・電気鉄道/ITS 合同研究会資料，TER-11-70，pp.65-70，2011
- 5) 佐藤正健，寺本晃大，大石潔，牧島信吾，上園恵一，保川忍：空転再粘着制御におけるトルク引き下げ量計算法の一検討，第 18 回鉄道技術・政策連合シンポジウム講演論文集，pp. 301-304，2011
- 6) 寺本晃大，大石潔，牧島信吾，上園恵一，保川忍：すべり加速度に基づいた空転再粘着制御の一検討，平成 24 年電気学会産業応用部門大会講演論文集，R5-4，pp. 221-224，2012
- 7) 牧島信吾，上園恵一，永井正夫：電圧飽和状態における電動機制御応答特性の検証及び考察，電気学会産業応用部門論文誌，Vol.130，No.5，pp.663-670，2010