# 2118 動輪のすべり加速度に基づいた再粘着制御

学[電] 〇寺本	晃大	τ.	E	[電・機	送] 大	云 潔	(長岡技術科学	大学)
正[電・機] ギ	牧島	信吾		上園	恵一	(東洋電	[機製造]	
正[電] 保川	忍	(元東)	洋電桥	幾製造)				

## 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 た電気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 検知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.主電動機の出力トル 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.2 Characteristics of adhesion coefficient

基準粘着係数μ<sub>2</sub>で正規化している. 接線力係数μ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μmax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

[No. 12-79] 日本機械学会 第 19 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 [2012-12.5~7. 東京]



Fig.4 One wheel model

 $\mu(v_s)W$ 

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[3].

# 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TLを推定し,推定負荷トルクfLに基づいた動輪が 確実に再粘着するTm-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fLと同程度のTm-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 電気車を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気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τ.を (2)式で推定できる.ここで、Jm: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, ωm:電動機の角速度, μ(vs):接線力 係数, vs:動輪のすべり速度, W:軸重, Rw:動輪半径, Ra: 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[rad/s]としている.

$$J_m \frac{d}{dt} \omega_m = \tau_m - \tau_L \tag{1}$$

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

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

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α及びβは行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.

$$\tau_{m-lim} = \beta \hat{\tau}_L \tag{4}$$

$$\tau_{m-rec} = \alpha \hat{\tau}_L \tag{5}$$

## 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 引き下げる方法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vs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.

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

$$\tau_m < \tau_L + J_m \frac{\kappa_g}{3.6R_m} \dot{\nu}_t \tag{7}$$

負荷トルクr<sub>L</sub>と車両加速度v<sub>t</sub>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.

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

(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 $\dot{v}_s$ 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TLsを求め,空転を検出し た瞬間のすべり速度をvs0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)式のようになる.

$$v_s(t) = v_{s0} + \frac{K}{\tau_{Ls}} \dot{v}_s^{ref} \left( 1 - e^{-\frac{\tau_{Ls}}{K}} t \right)$$
(9)  
$$K = J_m \frac{R_g}{2 \epsilon P}$$
(10)

$$^{n}\frac{Ag}{3.6R_{w}}$$
(10)



Fig.5 Linear approximation of tangential force



Fig.6 Average slip acceleration

ここで、トルクをt秒間引き下げた時のすべり速度を $v_{s1}$ とし、平均のすべり加速度 $\bar{v}_s$ を(11)式及び図6のように定義する.

$$\bar{\dot{\nu}}_s = \frac{\Delta \nu_s}{\Delta t} = \frac{\nu_{s1} - \nu_{s0}}{t} \tag{11}$$

(9)式及び(11)式より、トルク引き下げ後のすべり速度が 任意の値となるためのすべり加速度指令*v*<sub>s</sub><sup>ref</sup>の値は(12) 式で表される.

$$\dot{v}_{s}^{ref} = \frac{\tau_{Ls}}{K} \frac{\Delta v_{s}}{1 - e^{-\frac{\tau_{Ls}}{K}} \Delta t}$$
(12)

また,滑走発生時には動輪周速度が急速に減少するため, 再粘着させるためにはすべり加速度が正となればよいの で,発生トルクは(13)式で表される範囲とする必要があ る.したがって,(12)式を用いて設計するすべり加速度 指令が正となるようにΔυ,を設定すればよい.

$$\tau_m > \tau_L + J_m \frac{R_g}{3.6R_w} \dot{\nu}_t \tag{13}$$

提案法を使用する前提として、空転・滑走検知時の負 荷トルクと車両加速度が必要である.負荷トルクは外乱 オブザーバを用いることで空転・滑走検出時の値を推定 することが可能である.車両加速度については,絶対加 速度を得ることが望ましい.しかしながら、実用上,絶 対加速度を得ることは困難である.そのため本論文では, 粘着領域ではすべり速度の変化が限りなくゼロに近く, 空転・滑走領域では急峻に変化するとした仮定の下で, 空転・滑走による動輪加速度の変動分をフィルタによっ て除去することで得る.

このように,提案法を用いることで,従来法では試行 錯誤的に決定されていた再粘着制御におけるトルクの引 下げ量を理論的に決定することができる.

# 3. 等価実験システムを用いた検証

# 3.1 等価実験システムの構成

図7及び表1に実験機の構成を示す.電車の主電動機を 定格 0.75 kW の IPMSM によって模擬する.1 動輪換算し た 1M1T 編成電車ダイナミクスをリアルタイムに演算し て定格 2 kW の AC サーボモータによって再現する.電 車が制動する条件で実験を行う場合,駆動用モータは回 生動作となるため, DC リンク電圧が上昇する.実際の 電車では架線にエネルギを返すことによって回生動作を 実現しているが,本実験システムではブレーキチョッパ を用いてエネルギを消費させることで,駆動用モータの 回生動作を実現している.また,実際の車両から等価実 験システムへのスケーリングを考えると,等価実験シス



Fig.7 Structure of test bench

Table1 Specification of test bench

	symbol	value
駆動用 IPMSM		0.75 [kW]
DC リンク電圧(力行時)	VDC	200 [V]
DC リンク電圧(回生時)	V <sub>DC</sub>	215 [V]
負荷側サーボモータ		2 [kW]
合成慣性モーメント	$J_n$	0.00115 [kg m <sup>2</sup> ]
換算スケール	K <sub>c</sub>	750 [-]

Table2 Parameters of train model

	symbol	value
駆動系慣性モーメント	$J_m$	3.864 [kg m <sup>2</sup> ]
動輪半径	R <sub>w</sub>	0.430 [m]
歯車比	$R_q$	6.07
1動輪軸の軸上質量	W	10 [t]
1動輪軸の牽引質量	М	17.5 [t]
基準粘着係数	$\mu_z$	0.120

テムの慣性モーメントが不足してしまう.そこで,オブ ザーバ構成を用いて不足する慣性モーメントを補償して いる.なお,IPMSMの制御には,鉄道特有の1パルス制 御を再現するために M-T軸たすき掛け電流制御<sup>[7]</sup>及び最 大トルク制御を適用している.表2に電車モデルの各定 数を示す.なお,軸上質量と牽引質量が異なっているが, これは付随車質量を考慮しているためである.

### 3.2 性能評価指標

実験結果の性能評価手法として,粘着力利用率を用いる.時刻tにおける粘着力利用率の瞬時値: µur(t)を(14) 式で定義する.ここで,出力トルクに対する接線力係数: µu,その瞬間の粘着係数: µumaxとしている.

$$\tilde{\mu}_{ur}(t) = \frac{\mu}{\mu_{max}} \times 100 \tag{14}$$

粘着力利用率: $\bar{\mu}_{ur}$ は(15)式を用いて $\bar{\mu}_{ur}(t)$ を時間平均することで求める.ここで、力行を開始した時刻: $T_{det}$ 、列車速度が 40 km/h に達した時刻: $T_{end}$ とする.同様に制動時も列車速度が 40~0 km/h の範囲で評価を行う.

$$\bar{\mu}_{ur} = \frac{1}{T} \int_{t=T_{det}}^{t=T_{end}} \tilde{\mu}_{ur}(t) dt$$
(15)

### 3.3 実験結果

図8に従来法の再粘着制御を適用した場合の実験結果, 図9に提案法による実験結果をそれぞれ示す.従来法で は実験を繰り返すことで制御パラメータを試行錯誤的に 最適化を行い,提案法は理論的に引下げ量を決定した. 表2及び表3に従来法と提案法の制御パラメータを示す.

Table3 Control parameters of conventional method

Running condition	β [-]	α [-]
Acceleration	0.925	1.05
Deceleration	0.930	1.09

Table4 Control parameters of proposed method

Running condition	$\Delta v_s$ [km/h]	$\Delta t \text{ [ms]}$
Acceleration	-1.3	150
Deceleration	-1.3	150



Fig.8 Experimental result of conventional 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.25s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3s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 キチョッパが動作し、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に、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

- 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
- 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 (2M1C)の空転再粘着制御の一方式,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