

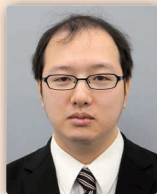
- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

車輪空転状態を早期に把握して 加速性能を向上する

鉄道車両では、雨や雪が降るとレールが湿ってしまい車輪が空転しやすくなります。空転が生じるとタイヤの乱れを引き起こす要因となるため、空転を防止する必要があります。そのために、通常、車輪の回転速度やその変化するスピードをみて空転の状況を判断し、車輪を回す力を制御します。ここでは、空転の兆候により発生する、電車の主電動機の電流の違いに着目することで、空転の発生を早期に捉える「電流差検知方法」と、これまでに機関車で空転防止の効果が確認されている「空転収束検知方法」を併用する、電車の新しい再粘着制御方法を紹介します。



山下 道寛
Michihiro Yamashita
車両制御技術研究部
駆動制御研究室
主任研究員
[専門分野] 電気車制御



三木 真幸
Masaki Miki
車両制御技術研究部
駆動制御研究室
副主任研究員
[専門分野] 電気車制御



吉川 岳
Gaku Yoshikawa
車両制御技術研究部
駆動制御研究室
副主任研究員
[専門分野] 電気車制御

はじめに

鉄道車両が加速する原理について簡単に説明します。まず、主電動機で生じた回転力（トルク）は、歯車を経て車輪に伝わります。次に、その回転力は、**図1**のように車輪とレールが接触している部分で、円周方向（接線方向）に「引張力」（赤矢印）としてレールに伝わります。一方、レールからの反力として青矢印で示す力を車輪が受けます。電車を加速させる力は、この反力によるものです。レールからの反力が大きいほど電車はより早く加速します。

鉄車輪と鉄レール間の摩擦係数は、自動車のようなゴムタイヤとアスファルト路面間の場合と比べて非常に小さ

くなっています。とくに雨雪時は、晴天時と同じ引張力だと車輪が空回りすることがあり、これを「空転」とよんでいます。空転したときのレールからの反力は「引張力」とはよばず、「接線力」とよびます。引張力と接線力の差が、ほぼ車輪が空転する力となります。**図2**に、レールと車輪の間に伝わる力を、粘着している状態と空転している状態に分けてそのイメージを示します。空転して空回りする速度（空転速度）が大きくなると、接線力は小さくなる傾向があります。そのため、空転が持続すると車両を加速する力が小さくなるため、タイヤ遅延の要因になります。また、車輪やレールにダメージを与え

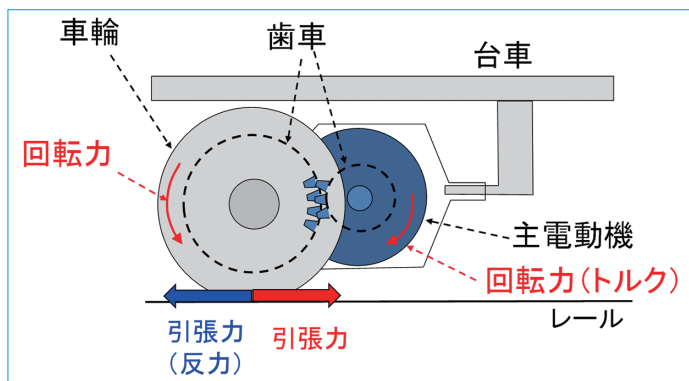


図1 レールと車輪の間に伝わる力

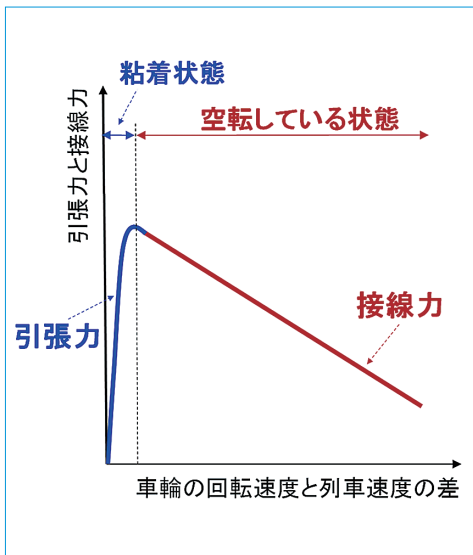


図2 レールと車輪の間に伝わる力

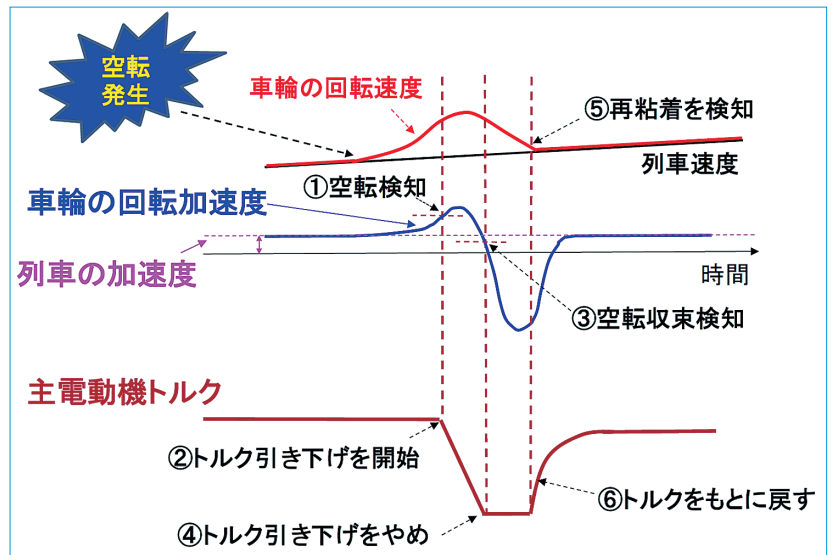


図3 回転加速度による空転検知とトルクの動作

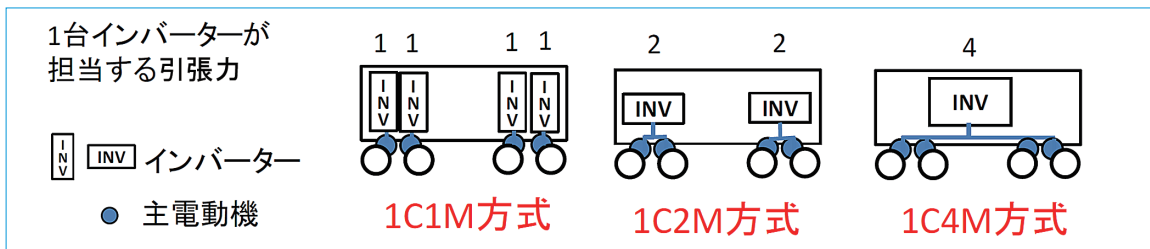


図4 インバーターと主電動機の駆動方式

てしまうことなどが懸念されます。

空転を防止する方法

空転を発生しにくくするには、駆動軸数（主電動機で回転する軸の数）を増やして、一つの車輪が受ける引張力を小さくする方法が考えられます。また、勾配が多い区間を走行する電車では、車輪手前に砂まき装置を設け、車輪・レール間の摩擦係数を大きくすることで滑りにくくする方法もあります。ただし、これらはコスト高となります。

低コストに空転を防止する方法として、主電動機の回転力（トルク）を制御する方法があります。空転を検知すると主電動機のトルクを瞬時に引き下げ、これにより空転が収まり車輪が正常回転に戻った状態が確認できれば、トルクをもとに戻します。なお、空転していない状態に戻ることを「再粘着」

とよびます。一般に、主電動機のトルクを制御する空転防止方法は、「空転再粘着制御方法」とよばれています。なお、主電動機はインバーターとよばれる装置で制御するため、空転再粘着制御を実施するのもこのインバーターの役目になります。

図3に、車輪の回転加速度により空転を検知した場合に、トルクを引き下げて再粘着に至る過程を示します。まず、空転していない場合は列車の加速度と車輪の回転加速度（進行方向への加速度）は同じですが、空転が始まると車輪の加速度の方が大きくなるため、これにより空転を検知（「空転検知」）します（①）。空転を検知した後、主電動機のトルクの引き下げを開始すると（②）、車輪の回転加速度は低下を始めます。そして、その値が列車の加速度を下回ると空転が収まったと判断

（「空転収束検知」）し（③）、トルクを引き下げをやめます（④）。車輪の回転速度が下がって、列車の速度と同じになると再粘着となり（⑤）、緩やかにトルクをもとに戻します（⑥）。しかし、再粘着後もすぐにまた空転が発生すると、（①）から動作を繰り返すことになります。このような場合には、トルクの上げ下げ動作にともなう車体の前後振動を感じると思われます。

ここでは、電車の列車加速度と乗り心地を向上する空転再粘着制御方法の最近の研究成果を説明します。

主電動機の並列駆動

電車ではおもにコストを抑える理由により、2台の主電動機（1C2M方式）、または4台の主電動機（1C4M方式）をまとめて制御します。

しかし、図4に示すように、1C1M

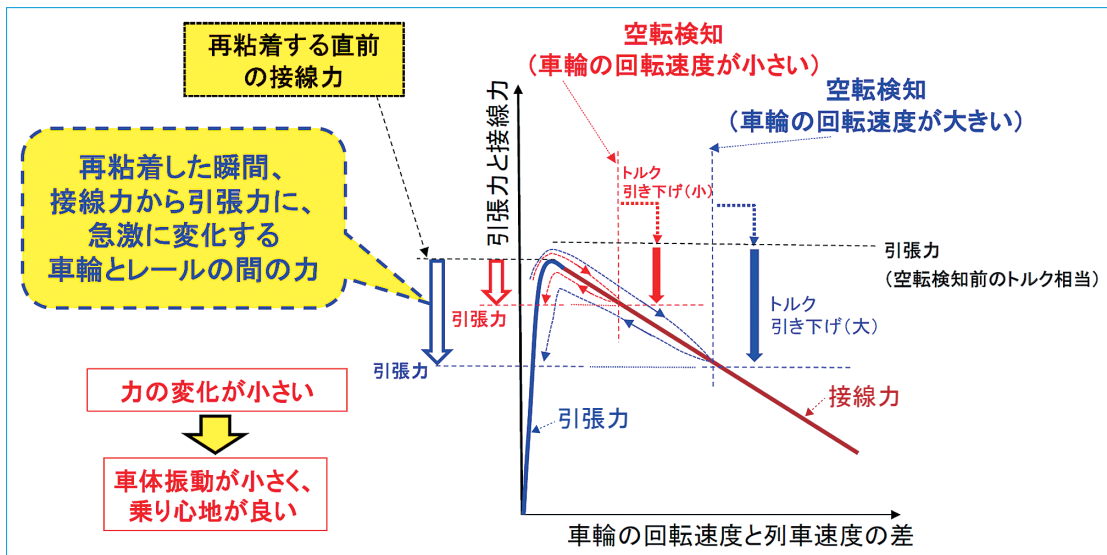


図5 空転発生から再粘着までの接線力の推移

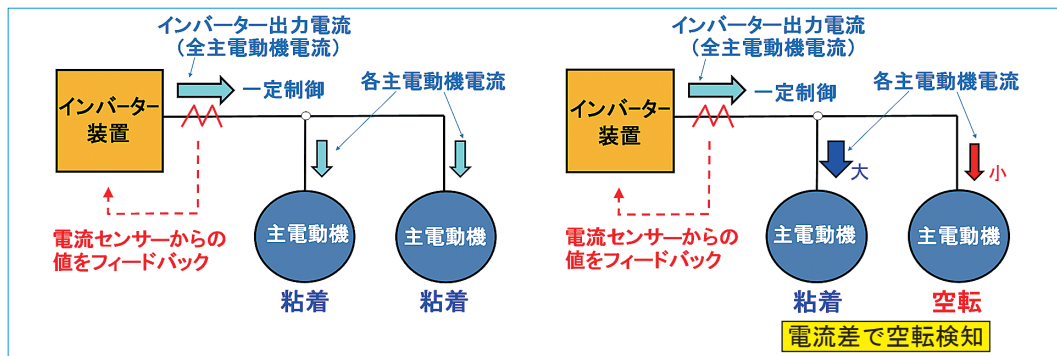


図6 1C2M電車の電流制御(左：粘着状態 右：空転直後の状態)

方式で1台のインバーターが担当する引張力を1とすると、1C2M方式では2倍、1C4M電車で4倍となります。そのため、1C2M方式や1C4M方式の電車では、再粘着制御が動作すると、列車加速度や車体前後振動への影響が比較的大きくとなると考えられます。

空転検知が遅れて車輪の回転速度が大きくなると、接線力が図5に示すように、車輪の回転速度と列車速度の差の拡大とともに低下していくため、トルクの引き下げ量は大きくせざるをえません(図5)。再粘着した瞬間には、車輪とレールの間の力は、接線力から引張力の値に急激に変化します(図5)。この急激な力の変化量は、ほぼ再粘着する瞬間の接線力と引張力との差になります。急激な力の変化は、車体に伝

わり、乗客の乗り心地に影響を与えません。とくに、1台のインバーターで複数の車輪軸を駆動する場合には、これらの車輪に空転と再粘着がほぼ同じタイミングで発生しますので、1C1M方式に比べて車体振動(乗り心地)に及ぼす影響は大きくなります。

電流差検知方法¹⁾

一つのインバーターで複数の主電動機を駆動する電車の場合、インバーター出力電流(すなわち各主電動機の電流の合計値)は一定になるように制御されます。(図6左図)このとき、ある車輪が空転すると、それに接続された主電動機の回転速度が増加しますが、これにともない主電動機の電流が減少します(図6右図)。これは逆起電力(電

流と逆向きに現れる電圧)が回転速度に比例して大きくなるために現れる現象です。しかしインバーターは出力電流を一定にしようとするため、空転していない車輪(粘着している車輪)に接続されている主電動機の電流は増加します。

電流の増減は、トルクの増減にほぼ比例するため、この状態を放置すると粘着軸もトルクが増加するため空転しやすくなり、両軸とも空転を開始し、やがて全軸空転に至ります。

前軸に空転が発生したとき、前軸と後軸の電流差を空転検知に利用することで、空転が進展(接線力が低下する)する前に、小さなトルク引き下げを行うことで、空転が抑制できそうです。電流差で検知するメリットは、空転が

発生した直後に、空転と判別しやすい大きな電流値(50A~100A)が現れる頻度が多いことです。

加速度情報による空転検知²⁾

各車輪がほぼ同時に空転するような状況などでは、電流差が値として表れにくい場合もあります。その場合には電流差で空転を検知しにくいので、従来制御と同様に、回転加速度で空転を検知し、トルク引き下げを行います。ただし、余分にトルクを引き下げると、列車加速度と乗り心地を低下させるので、空転収束(図3の④のタイミング)を適正に検知することが求められます。

回転加速度の情報は、主電動機または車輪に取り付けられた回転センサー情報から取得しているため、車輪の回転加速度の情報に加えて、台車や車体の振動によるノイズ成分が含まれます。空転検知の誤りを防止するためには、そのノイズ成分を除去する必要がありますが、これらは小刻みに速く変化する特徴があるため、小刻みに速く変化する成分を除去(平滑化処理)した情報が用いられます。しかし、この処理によって加速度の変化が実際よりも遅れることがあり、空転収束検知の遅れにつながります。

そこで、空転再粘着制御に用いる回転加速度情報として、ある程度速い変化に追従する平滑化処理を施した情報と、十分な平滑化処理を施した情報の両方を用いることにより、適切に制御する方法を開発しました。この方法は、図7に示すように空転検知に後者の情報を、空転収束検知に前者の情報を用います。これにより、十分な平滑化処理を行った加速度信号の遅れを改善(小さく)して、主電動機トルクの引き下げ量を低減することにより、乗り心地が向上するとともに加速の向上が期待できます。

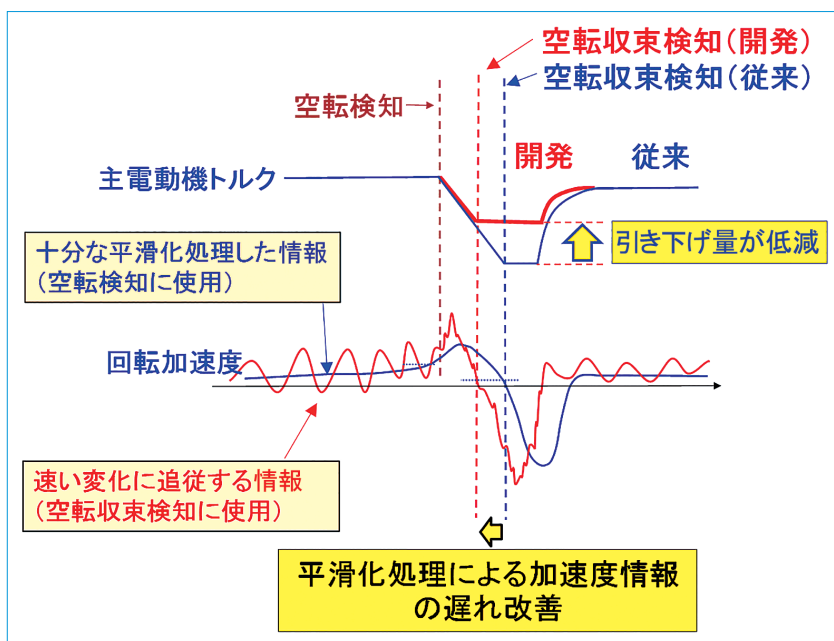


図7 回転加速度を用いた空転検知と空転収束検知

走行試験結果

これら2つの空転検知を併用した空転制御の効果を確認するため、1C2M方式の近郊形電車を用いて散水試験を行いました。性能評価には、平均加速度による評価と、乗り心地評価をそれぞれ行いました。

平均加速度は、速度5km/hから速度40km/hまでの加速に要した時間から算出しました。また、乗り心地評価では、車体前後振動に関して、振動加速度の最大値による評価以外に、鉄道分野で乗り心地評価指標として広く用いられている乗り心地レベル L_T 値²⁾による乗り心地評価を行いました。 L_T 値とは、振動加速度をベースに周波数ごとの人間の感じやすさを考慮して算出される指標であり、値が小さいほど乗り心地がよいとされます。

従来制御と開発制御を比較すると、開発制御では、列車加速度は5%以上向上する結果が得られ、最大 L_T 値は約7dB低減する結果を得ました。また、車体の前後振動加速度の最大値は半減しており、前後振動の低減および乗り心地向上を確認しました。

まとめ

主電動機間の電流差に着目した「電流差検知」と、空転検知用の加速度情報よりも早い変化に追従する加速度情報を用いた「空転収束検知」を併用することで、空転検知時のトルク引き下げ量が低減され、列車加速度と乗り心地が向上しました。

この制御方法は、2016年以降、JR西日本の323系通勤形電車、227系1000代近郊形電車、271系特急形電車などの新形式電車に採用されています³⁾。[RRR]

文献

- 1) 山下道寛, 三木真幸, 大江晋太郎, 島田直人, 山中章広, 北村琢也: 速度センサレス電車の主電動機電流情報を用いた空転抑制方法, 鉄道総研報告, Vol.31, No.6, 2017
- 2) 山下道寛: 空転の状態判断を早めて加速力を向上する, RRR, Vol.75, No.1, 2018
- 3) 山中章広: 323系電車に向けた空転再粘着制御の開発, RRR, Vol.75, No.5, 2018