

電気機関車の軸重移動を考慮した 空転再粘着制御法の開発

山下 道寛* 添田 正**

**Development of Re-adhesion Control Method Considering
Axle-weight Transfer of Electric Locomotive.**

Michihiro YAMASHITA Tadashi SOEDA

When a wheel slip occurs on a certain axle or when re-adhesion control is executed, the tractive force of the wheel-slip axle changes, which causes pitching of the bogie and the carbody. Consequently, a change occurs in the weight acting on other axles under adhesive status, and wheel slips are likely to be induced. If re-adhesion control is conductible, considering the changes in the weight acting on other axles as a result of axle-weight transfer from the wheel-slip axle, the use of adhesive force can be optimized. We developed a control system as designed to reduce the induction of wheel slip in consideration of axle-weight changes caused by other wheel slips. Specifically, the torque of other axles is increased or decreased based on the acceleration of the wheel-slip axle to suppress the induction of wheel slip. To verify the effectiveness of the control method, we conducted a water spring wheel-slip test using an EH200-type DC electric locomotive. We obtained the results such that the number of wheel slips decreases by approximately 20% on average, and verified that the average tractive effort increases by 4%.

キーワード：電気機関車，再粘着制御，軸重移動，軸重移動補償，空転，けん引力

1. はじめに

電気車の起動時には、各車輪踏面に生じる引張力により、台車枠や台車牽引装置、車体、連結器へ駆動力が伝わる。この時、けん引反力によって台車中心や車体中心に回転モーメントが生じ、各軸に軸重移動が生じる。特に、けん引力が大きな電気機関車では、軸重移動量が大きくなる傾向がある。そのため、各軸の滑りやすさにアンバランスが生じ、粘着力を有効に利用できなくなる。したがって、電気機関車のような少ない駆動軸数で大きなけん引力を必要とする場合には、粘着力の利用状況が貨物けん引トン数やダイヤに影響を及ぼすため、軸重移動に対し適切な補償を行う必要がある¹⁾。

従来からの軸重移動を補償する方法としては、機械的補償と電氣的補償が知られている。最近のインバータ制御電気機関車では、けん引装置をレール付近に近づける機械的補償法と、実用面から適切と考えられる範囲で、各軸の引張力を比例配分する電氣的補償法が採用されている。

一方、空転時及び再粘着制御時においては、台車内のある軸が空転すると、空転していない他の軸の空転を誘

発し、粘着力を有効に利用できない場合があることが報告されている²⁾。このような状況が多発すると、貨物けん引トン数等に影響を及ぼすため、この空転誘発現象を防止する様々な試みや検討がなされている^{3~6)}。

そこで、上述した課題(空転誘発現象)に対応するため、空転軸が多軸に及ぼす軸重移動を考慮して、空転誘発を抑制する再粘着制御法を開発した。そして、その有用性を確認するため、EH200形式電気機関車を用いて走行試験を実施した。その結果、空転頻度を低減し、けん引力が向上する効果が得られたので報告する。

2. けん引力による粘着への影響

2.1 軸重移動と従来の補償

電気車の起動時に発生する各軸の軸重移動について図1に示す。

軸重移動は、台車内での軸重移動と台車間での軸重移動(以下、台車内軸重移動、台車間軸重移動とする)があり、各軸の軸重移動量は、この二つの軸重移動量の和で求められる。台車内軸重移動は、台車内の車輪踏面に働く伝達力の和とレール頭頂面からけん引装置までの高さ距離 h によって台車に生じる回転モーメントにより発生する。また、台車間軸重移動は、全軸の伝達力がレール頭頂面から牽引装置までの高さ距離 h とレール頭頂面

* 車両制御技術研究部(駆動制御)

** 日本貨物鉄道株式会社(技術開発部)

特集：鉄道車両技術

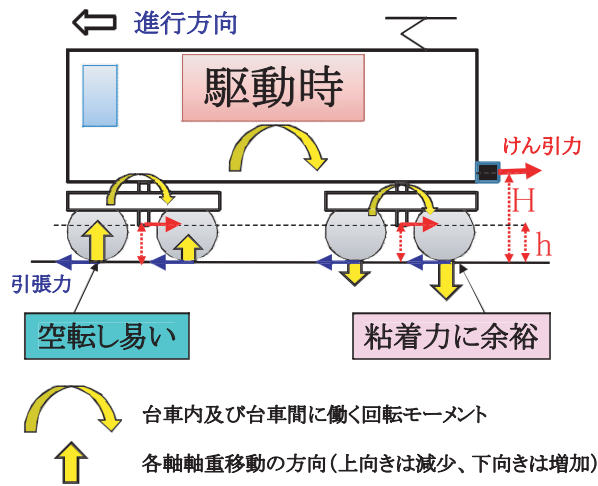


図1 駆動時の各軸軸重の傾向

から連結器までの高さ距離 H との差によって、車体に生じる回転モーメントにより発生する。駆動時の軸重の傾向は、第1軸、第2軸、第3軸、第4軸の順に軸重の値が大きくなる。

走行時（駆動時）の各軸の軸重移動量 $\Delta W_1 \sim \Delta W_4$ は、図2に示した一車両モデルを用いて(1)～(4)式で記述される⁷⁾。

なお、主電動機駆動方式は、車軸と台車枠で支持される吊り掛け式である。また、各軸の滑りやすさの指標となる「引張力/軸重」 μ_n は(5)式から求められる。添え字 n は軸番号であり先頭軸を第1軸とした。

$$\Delta W_1 = -\frac{R}{l} F_{e1} - \frac{R}{l} F_{e2} + \frac{\frac{D}{2}-h}{l} F_{l1} + \frac{\frac{D}{2}-h}{l} F_{l2} - \frac{H-h}{2L} (F_{l1} + F_{l2} + F_{l3} + F_{l4}) \quad [N] \quad (1)$$

$$\Delta W_2 = +\frac{R}{l} F_{e1} + \frac{R}{l} F_{e2} - \frac{\frac{D}{2}-h}{l} F_{l1} - \frac{\frac{D}{2}-h}{l} F_{l2} - \frac{H-h}{2L} (F_{l1} + F_{l2} + F_{l3} + F_{l4}) \quad [N] \quad (2)$$

$$\Delta W_3 = -\frac{R}{l} F_{e3} - \frac{R}{l} F_{e4} + \frac{\frac{D}{2}-h}{l} F_{l3} + \frac{\frac{D}{2}-h}{l} F_{l4} + \frac{H-h}{2L} (F_{l1} + F_{l2} + F_{l3} + F_{l4}) \quad [N] \quad (3)$$

$$\Delta W_4 = +\frac{R}{l} F_{e3} + \frac{R}{l} F_{e4} - \frac{\frac{D}{2}-h}{l} F_{l3} - \frac{\frac{D}{2}-h}{l} F_{l4} + \frac{H-h}{2L} (F_{l1} + F_{l2} + F_{l3} + F_{l4}) \quad [N] \quad (4)$$

$$\mu_n = \frac{F_{ln}}{W_n + \Delta W_n} = \frac{F_{en} - m\alpha_n}{W_n + \Delta W_n} \quad (5)$$

$$F_{en} = \tau_{en} (GD/2), \quad n=1 \sim 4$$

ここで、

R : 大歯車半径 0.41[m]

l : 台車内の車軸間距離 2.50[m]

D : 車輪径 1.12[m]

G : 歯車比 5.125

L : 台車中心間距離 6.40[m]

h : レール頭頂面から牽引装置までの高さ距離 0.22[m]

H : レール頭頂面から連結器までの高さ距離 0.88 [m]

F_{en} : 第 n 軸の動輪周引張力 [N]

F_{ln} : 第 n 軸の引張力 (接線力) [N]

W_0 : 静止軸重 164[kN]

ΔW_n : 第 n 軸軸重の変化分 [N] (増加する場合を正)

α_n : 第 n 軸加速度 [m/s/s]

m : 駆動系等価慣性質量 1946[kg]

τ_{en} : 第 n 軸電動機トルク [Nm]

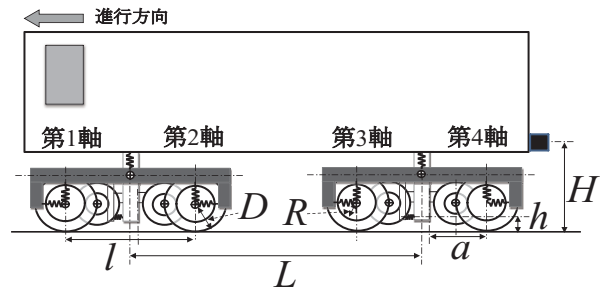


図2 EH200形式直流電気機関車の一車両モデル

(1)～(4)式の右辺第1～4項は台車内の軸重移動量を表す。第1項と第2項は電動機トルク反力により台車内に発生する軸重移動分であり、第3項と第4項は台車枠重心周りに働く回転モーメントによる軸重移動分を表す。第5項は前後の台車間に発生する軸重移動分を表す。ここで、起動直後における各軸引張力を55,000Nとした時の軸重移動量を図3に示す。最大で約±20,000Nの軸重移動が発生することがわかる。これは、静止軸重に対し約±13%の軸重移動量に相当する。また、各軸の引張力に対する軸重の比「引張力/軸重」 μ を図4に示す。

静止軸重に対する引張力の比は0.334であるが、軸重移動を考慮した場合には、各軸の「引張力/軸重」は0.295～0.383となり、軸毎の滑りやすさが大きく異なることが分かる。悪天候等によりレール・車輪間の状態が乾燥時よりも滑りやすくなっている場合には、各軸の滑りやすさが不均一となり粘着力を有効に利用できなくなる。

このような各軸の滑りやすさに差ができる状態を補償するために、従来から機械的補償と電氣的補償が行われてきた。機械的軸重移動補償は、次に述べる三つの方法が知られている。一つ目は、台車けん引装置を極力レール面に近づける方法である。二つ目は、台車内の回転モーメントを打ち消すように機械的なりんく機構を構成する方法(例えば、ジャックマン軸方式)、及び台車間の回転モーメントを生じさせないように、台車けん引装置

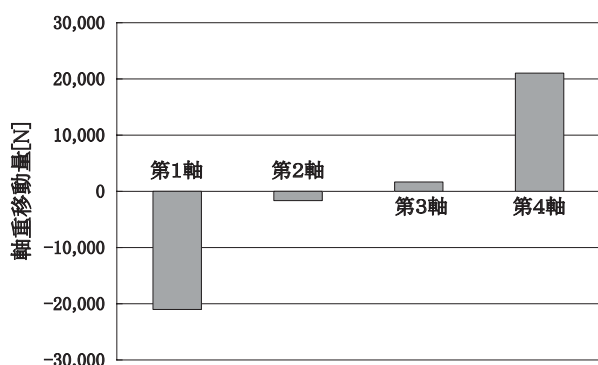


図3 各軸の軸重移動量

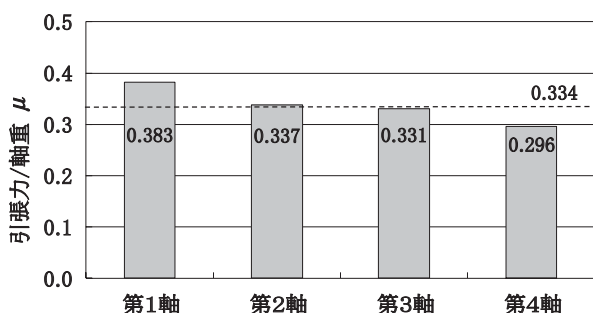


図4 各軸の「引張力/軸重」

と連結器高さを一致させる構成（台車間と連結器間を棒連結とする方式）である。三つ目は、一台車内に1台の電動機を装荷して、2軸を連結駆動する方式であり、台車内の軸重移動を補償する。これらの機械的方法は従来から用いられてきたが、メンテナンスが増加する傾向にあるため、最近ではあまり用いられていない。次に、電気的軸重移動補償について説明する。電気的方法では、各軸の電動機トルクが個別に設定できる場合、各軸の軸重移動量に合わせて各軸の引張力（電動機トルク）を調整する。軸重が減少する軸の引張力を若干低めに設定し、軸重が増加する軸の引張力を若干高めに設定することで、できるだけ各軸の滑りやすさを均等化させる。この方法は各軸個別電動機制御方式で用いられている。

2.2 空転誘発現象

ある軸の空転や再粘着制御により、他の健全軸に空転を誘発する場合がある。これまで、この現象について明らかにされていなかった。そこで、台車内において空転誘発現象を分かりやすく再現させた現車試験結果を図5に示す。空転軸からの誘発により発生したと考えられる空転が連続的に示されている。図中には台車内の各軸速度と電動機トルクに相当する各軸トルク分電流指令が示されている。

台車内の前軸が空転し再粘着制御が行われると（図中の破線）、その直後に第2軸の空転が発生している状況が分かる。特に後軸に空転が誘発されやすい傾向がある。

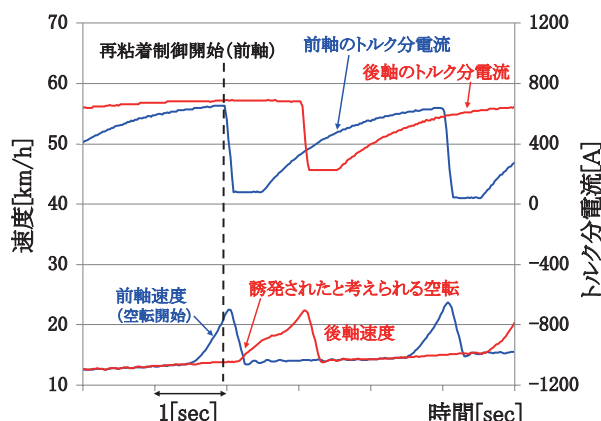


図5 実車での空転誘発現象の例

第1軸が空転したとき、台車・車体に働く回転モーメントが変化し健全軸の軸重が変動する。このため、各軸の空転が誘発されやすくなる。この現象により空転が多発すると車両のけん引力が大きく低下することになる。

2.3 空転誘発再現シミュレーション

空転時の軸重移動の観点から、空転誘発現象の再現シミュレーションを実施した。以下、シミュレーションの前提条件等について述べる。

- ・電気機関車モデルは、EH200形式直流電気機関車の1車両分のモデル（図2）を用いた。
- ・粘着走行時は、車輪とレール間の「引張力/軸重」 μ は、粘着係数 μ_s （最大引張力を与える「引張力/軸重」）よりも小さいとした。
- ・空転発生時及び空転時（巨視すべり領域）に用いる接線力係数 μ は(6)式で記述され、「すべり速度-接線力係数」 μ に従うこととする⁸⁾。その特性を図6に示す。

$$\mu = \mu_s - \Delta\mu - \rho V_s \tag{6}$$

- ここで、 μ_s : 空転前 ($V_s=0$) の粘着係数
- $\Delta\mu$: 空転発生時の粘着係数低下分
- V_s : すべり速度 [km/h]
- ρ : すべり速度負勾配 [0.02/(km/h)]

台車内で空転誘発現象を再現させたシミュレーション結果を図7に示す。初期値として各軸の引張力を55,000[N]としたとき、各「引張力/軸重」は $\mu_1=0.379$ 、 $\mu_2=0.332$ となった。シミュレーション開始から1秒後において、第1軸と第2軸の粘着係数を0.338と減少させた。第1軸は空転を開始し、空転を検知（速度差1.0km/h）すると再粘着制御が動作する。再粘着制御は図5中に示されているトルク分電流の引下げ方法とほぼ同じとした。第1軸のトルク分電流の引下げと同時に、第2軸の軸重が低下するため、第2軸の μ_2 は増加し粘着係数に一致した。このとき、第2軸の空転が開始することになる。再

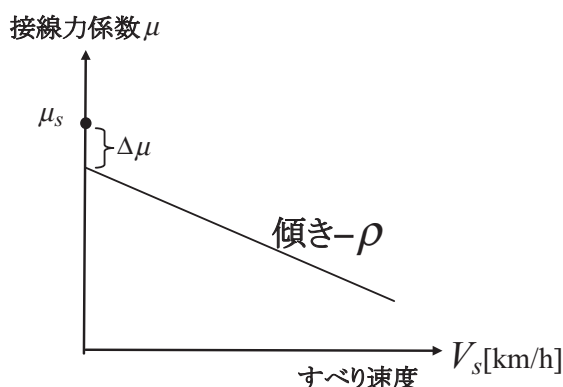


図6 「すべり速度-接線力係数」μの特性

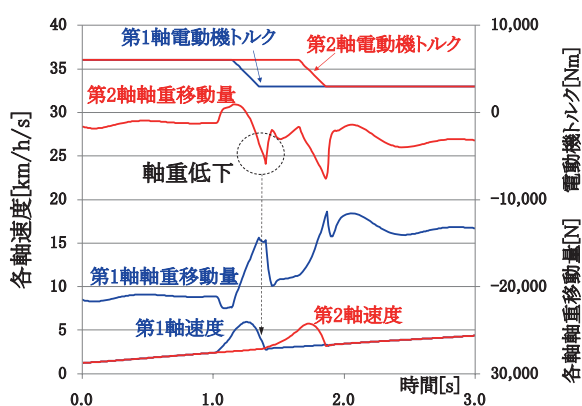


図7 空転誘発の再現シミュレーション結果

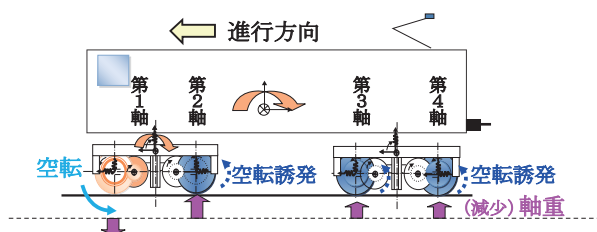


図8 一車両モデルにおける空転時の軸重移動例

粘着制御により、電動機トルクが急変すると、台車枠の回転モーメントが急変するため、その変化が他軸の軸バネを通して軸重に影響を与える。このことから、空転時の軸重移動が空転誘発の要因となることが確認できた⁷⁾。

一車両に拡大した空転時の軸重移動の傾向について図8に示す。各軸の車輪直下に示す矢印は、空転軸のトルク引下げ時における各軸の軸重の増減を示す。矢印が上向きでは軸重が減少し、下向きでは増加することを示す。第1軸が空転すると台車と車体に働く回転モーメントの減少により、後軸の軸重が減少する様子が示されている。よって、再粘着制御時の電動機トルク引下げにより、他の健全軸の軸重が変化し、空転が多発する要因となると考えられる。

3. 軸重移動を考慮した空転再粘着制御

空転頻度を低減するため、新たに開発した軸重移動を考慮した空転再粘着制御について以下に述べる。

まず、起動時の各軸の滑りやすさを均等化するため、予め設定した各軸の「引張力/軸重」指令 (μ^*) に従うように、各軸のトルク制御を行う方法について説明する。

各軸の軸重移動量を算出する式(1)～(4)式を、「引張力/軸重」を表す(5)式に代入して、動輪周引張力 F_e について整理すると、(7)式(行列表現)が得られる。(7)式は「引張力/軸重」(指令値) $\mu_1^* \sim \mu_4^*$ を成り立たせる各軸の電動機トルク指令 τ_e^* となる。この電動機トルク指令 τ_e^* からインバータ制御装置のトルク分電流指令 I_{qref_p} が求められる。

$$\tau_e^* = \frac{2}{GD} F_e \quad (7)$$

$$\text{ここで, } F_e^* = (CI - A)^{-1} (m - B + \mu^* W) \quad (8)$$

$$I_{qref_p} = k \tau_e^* \quad (k: \text{定数}) \quad (9)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \mu_1^* (-a+b-c) & -\mu_1^* c & -\mu_1^* c \\ \mu_2^* (a-b-c) & 0 & -\mu_2^* c & -\mu_2^* c \\ \mu_3^* c & \mu_3^* c & 0 & \mu_3^* (-a+b+c) \\ \mu_4^* c & \mu_4^* c & \mu_4^* (a-b+c) & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1-b+c & c-b & c & c \\ b+c & 1+b+c & c & c \\ -c & -c & 1-b-c & -b-c \\ -c & -c & -b-c & 1+b-c \end{bmatrix}$$

$$CI = \begin{bmatrix} 1-A_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-A_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-A_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-A_4 \end{bmatrix} \quad F_e^* = \begin{bmatrix} F_{e1}^* \\ F_{e2}^* \\ F_{e3}^* \\ F_{e4}^* \end{bmatrix}$$

$$W = \begin{bmatrix} W_0 \\ W_0 \\ W_0 \\ W_0 \end{bmatrix} \quad \tau_e = \begin{bmatrix} \tau_{e1_p} \\ \tau_{e2_p} \\ \tau_{e3_p} \\ \tau_{e4_p} \end{bmatrix} \quad F_w = \begin{bmatrix} F_{w1} \\ F_{w2} \\ F_{w3} \\ F_{w4} \end{bmatrix} \quad I_{qref_p} = \begin{bmatrix} I_{qref_p1} \\ I_{qref_p2} \\ I_{qref_p3} \\ I_{qref_p4} \end{bmatrix}$$

$$\mu^* = \begin{bmatrix} \mu_1^* \\ \mu_2^* \\ \mu_3^* \\ \mu_4^* \end{bmatrix} \quad a = \frac{D}{2l} \quad b = \frac{D-h}{l} \quad c = \frac{H-h}{2L}$$

$$A_1 = \mu_1^* (-a+b-c) \quad A_2 = \mu_2^* (a-b-c) \\ A_3 = \mu_3^* (-a+b+c) \quad A_4 = \mu_4^* (a-b+c)$$

次に、空転時の軸重移動による空転誘発を抑制するため、動的な軸重移動に対応した空転誘発抑制制御について

述べる。空転再粘着制御のトルク引下げによって、健全軸の軸重を変化させるが、その引下げ量は空転発生時の加速度に比例する傾向にある。これは動輪周引張力と接線力（レールが車輪を押す力）の差は、駆動系慣性（電動機回転子、大歯車、小歯車、車輪軸）を回転させる力となるためである。この差が大きいと加速度が大きくなる。そのため、トルク引下げ量は、空転時の加速度にほぼ比例すると考えることができ、空転軸の加速度に応じて、健全軸の電動機トルクを微減することで、空転時の軸重移動による影響を補償し、空転誘発抑制に効果があると考えられる。

上記で述べた提案方法を反映させた再粘着制御アルゴリズムを図9に示す。

「 μ^* - 電流指令演算器」は、静的な軸重移動を電氣的に補償するトルク分電流指令演算器である。ノッチ指令に応じて、予め設定した各軸の「引張力/軸重」指令(μ^*)が「 μ パタン指令」から「 μ^* - 電流指令演算器」に入力され、(7)～(9)式の演算を行うことで、各軸の電動機トルク分電流指令が決定される。

速度と加速度情報は、各電動機のPGセンサからの電圧パルス信号に基づいて算出し「再粘着制御器」に入力される。再粘着制御器の基本動作としては、速度差検知

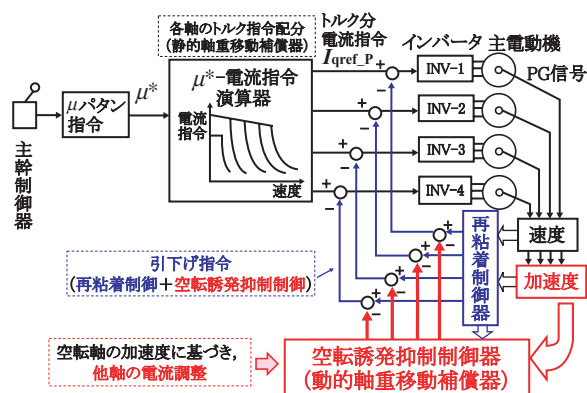


図9 開発した空転再粘着制御アルゴリズム

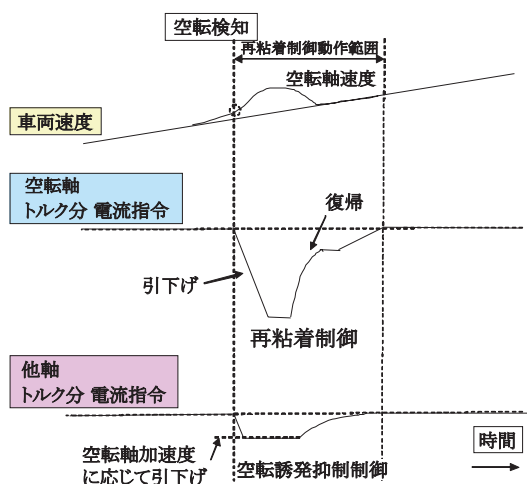


図10 空転時の各トルク分電流指令動作の例

フラグと加速度検知フラグの論理積により空転検知し、空転検知すると、空転軸の速度と加速度に応じて、トルク引き下げ、保持、トルク復帰を行う。また、空転を検出した場合には、図10中の各トルク分電流指令動作例に示されるように、再粘着制御と空転誘発抑制制御は同時に行われる。なお、図9の「空転誘発抑制制御器」からは、空転した軸の加速度に応じた空転誘発抑制制御用の引下げ指令が出力され、「再粘着制御器」からの引下げ指令と加算されて、トルク分電流指令から減算される。

4. 現車試験^{9), 10)}

提案した空転誘発抑制制御の効果を検証するため、JR貨物高崎操車場の着発線において走行試験を実施した。

4.1 走行試験概要

試験車両はEH200形式直流電気機関車（図11）を用いた。なお、駆動軸は4軸分（前側一車体）とした。構内走行時の試験車両編成を図12に、試験条件を表1に示



図11 試験車両 EH200形式直流電気機関車

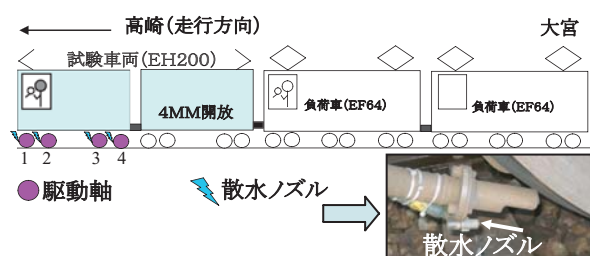


図12 試験車両編成

表1 試験条件

供試車両	EH200形式直流電気機関車1両 EF64形式直流電気機関車2両
試験場所	高崎操車場駅構内での着発線
走行距離	300m（直線と曲線半径1200m区間）
散水ノズル	車輪手前のセラジェットノズルに仮設（図12）
散水量	一車輪あたり 0.5l/min
μ パタン指令値	0.32（牽引力210kN相当）
走行速度	0～35km/h

特集：鉄道車両技術

す。試験走行時には、負荷となる貨車を模擬するため負荷用機関車EF64を2両連結した。そして負荷車に適当な踏面ブレーキでブレーキ力を与えて負荷(貨車650ton相当)を模擬した。また、雨天時を模擬するために、各駆動軸の前方に散水ノズルを仮設し、1車輪あたり毎分0.5リットルの車上散水条件において試験を実施した。

4.2 走行試験結果

空転誘発抑制制御の効果を確認するため、制御「有り／無し」の場合における空転再粘着制御試験を実施した。図13はその走行試験結果の例である。図中には、第1軸～第4軸のトルク分電流と速度がそれぞれ示されている。トルク分電流に○を付けた個所は、再粘着制御によるトルク分電流が引き下げられたポイントを示す。空転抑制制御時の引下げトルクは、再粘着制御時の引下げトルクに比べて小さく、早目の小さなトルク引下げで空転誘発を抑え、空転してから大きく引き下げる無駄をなくしていることが分かる。留意点として、空転再粘着制御により健全軸が常に空転誘発されるとは限らないこと、空転誘発されなかった場合には、けん引力損失に繋がることが挙げられる。

今回は、従来の再粘着制御に空転誘発抑制制御を併用することで良好な結果が得られた。数回の試験結果を平

均すると、空転再粘着制御の実施回数は約20%減少し、平均けん引力は約4%増大することを確認した(図14)。

5. まとめ

空転時及び再粘着制御時には、空転していない他の軸の空転を誘発し、粘着力を有効に利用できない場合があった。そこで、今回、空転軸が引き起こす他軸の軸重移動を補償し、空転誘発の軽減を目指す制御方式を開発した。

制御の有効性を確認するため、EH200形式直流電気機関車を用いて散水空転試験を実施した結果、空転誘発の抑制と、けん引力の向上を両立させ得ることを確認した。これにより、起動加速度の向上や撒砂量の低減、被けん引貨車両数の増加等への寄与が期待できる。

今後、複数台駆動方式の電気機関車へ本方式の適用を検討する予定である。

謝辞

実車試験を行うに当たりご協力を頂いた日本貨物鉄道(株)、(株)東芝府中事業所交通ドライブシステム部の関係各位に謝意を表す。

文献

- 1) 電気学会技術報告673号：鉄道車両における粘着制御技術
- 2) 大橋，勝又，安岡，山城，斉間：個別分散VVVF制御方式による電気車の粘着性能向上について電気学会交通電気鉄道研究会，TER-92-49，1992
- 3) 渡邊，大江：空転再粘着時の台車振動抑制策一状態推定によるアクティブ制振，電気学会全国大会，8-149，1994
- 4) 近藤，渡邊，大江：空転再粘着制御時の動的軸重補償法の検討，電学産業応用部門大会184，1994
- 5) 山下，渡邊：空転及び空転再粘着制御による他軸の空転現象，電気学会産業応用部門大会，Ⅲ-133，2005
- 6) 安岡，望月，戸田，中沢，他：誘導電動機個別駆動方式電気機関車の再粘着制御に関する実験的考察，電学論D，128巻1号，2008
- 7) 山下：空転誘発を抑制する引張力制御，電気学会交通電気鉄道研究会，TER08-8，2008
- 8) 渡邊，小笠：すべり速度帰還トルク制御による電気車の再粘着性能改善，電学論D，114巻10号，1994
- 9) 山下，大江，添田：空転誘発を抑制する電気機関車制御の現車試験結果，電気学会全国大会，2009
- 10) 山下，添田：電気機関車の空転頻度低減制御，No.1404，p.109，Jrail2009

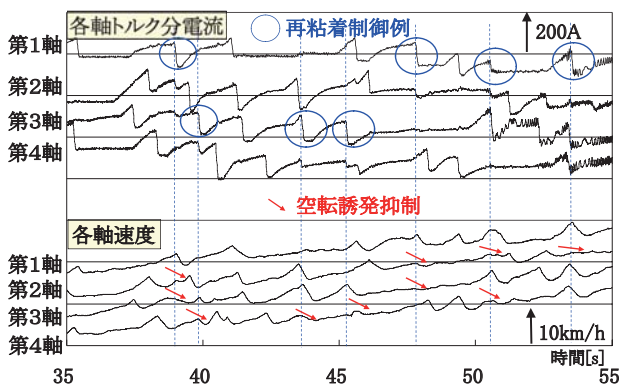


図13 軸重移動を考慮した再粘着制御試験結果の例

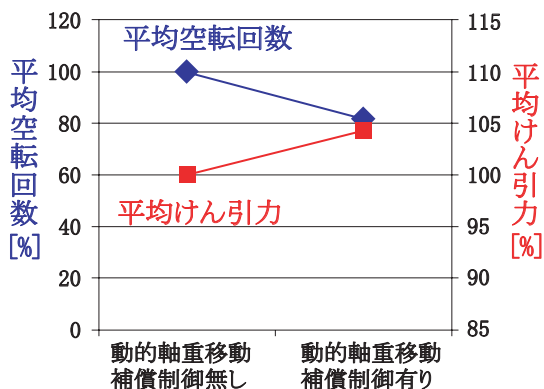


図14 平均空転回数と平均けん引力