

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

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***

**Slip Suppressing Control Method Using Information of Traction Motor Current of EMUs
Driven by Multiple Traction Motors Without Speed Sensor**

Michihiro YAMASHITA Masaki MIKI Shintaro OHE
Naoto SHIMADA Akihiro YAMANAKA Takuya KITAMURA

As for the Electric Multiple Unit (EMU), the system to drive multi traction motors (induction motors) by one inverter is generally adopted. Nowadays, the traction motors control method without speed sensor is widely used.

This paper describes the development of a traction motor control method which could suppress a wheel-slip by detecting it earlier and with smaller amount of torque drop than the conventional method, by focusing the amplitude difference between each traction motor current vector (current difference), for EMUs driven by the parallel-connected two traction motors without speed sensor installed in the bogie.

To verify the effectiveness of the developed control method, we performed the running test with water sprayed using a test EMU. As a result, the average EMU train acceleration in the running direction was increased by more than 5%, the number of the slip detection by acceleration was reduced by half, and the ride comfort was improved.

キーワード：空転検知，複数台主電動機，電流差，ベクトル制御，空転再粘着制御

1. はじめに

電車では一つのインバータ制御で複数の主電動機（誘導電動機）を駆動する主回路構成が広く採用されている^{1) 2) 3)}。誘導電動機の固定子電流は、磁束生成に寄与する成分とトルクに比例する成分に分けて考えることができ、最近の主電動機制御では、トルク成分電流（トルクに比例）を可変に、磁束成分電流（磁束に比例）を一定に制御することで、高応答なトルク制御を可能とするベクトル制御が使用されている。

鉄道車両では、インバータ出力電流（各主電動機電流の合計値）に対して、電流一定制御がなされている。そのため、主電動機が並列に接続される主回路方式の場合には、各成分電流の平均値に対して制御することになる。最近では、ベクトル制御に、速度センサ（日本ではPGセンサが広く使用されている）を用いないでトルク制御する「速度センサレスベクトル制御」が採用されてきている。

本論文では、1台のインバータで2台の主電動機（1C2M）を速度センサレスベクトル制御で駆動する電車（本論文中では速度センサレス電車と呼ぶ）を対象と

した、新しい空転制御方法を報告する。

複数台の電動機を並列接続して一括制御する場合、ある車輪に空転が発生すると、空転軸の主電動機電流は減少し、粘着軸の主電動機電流は増加する⁴⁾。電流の増減は、主電動機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トルクの増加する粘着軸も空転しやすくなり、両軸とも空転を開始する。両軸の回転加速度（平均値）が列車加速度よりも十分大きいと判断され空転検知に至ると、主電動機トルクを引き下げて（再粘着制御）空転を防止することになる。並列接続された複数台電動機では、一括してトルク制御することになるため、空転発生時や再粘着制御動作時には、個別主電動機制御（1C1M）電車に比べて、空転再粘着制御による列車加速度や車体前後振動への影響は大きくなる傾向にある。

研究の前段として、1C2M電動台車方式電車の空転現象を調査するため雨天を模擬する散水試験を実施した。その結果、各主電動機の3相2相変換によって求められる一次電流ベクトルの大きさの差（以下、電流差とする）に着目することで、主電動機回転子の回転加速度から空転を検知するよりも早く、空転の兆候を検出できる可能性があることが確認された。そこで、電流差を空転検知に用いることで、早めに空転の兆候を捉えて空転を抑制する主電動機トルク制御方法を開発した^{5) 6)}。

* 車両制御技術研究部 駆動制御研究室

** 元車両制御技術研究部 駆動制御研究室

*** 西日本旅客鉄道株式会社 車両部 車両設計室

特集：車両技術

開発した制御の有効性を確認するため、散水走行試験を実施した。その結果、空転が早期に検出されることで、小さなトルク引下げ量によって空転を抑制することができ、列車の平均加速度は現状よりも向上した。同時に、空転発生時の大きな車体前後振動が生じにくくなり、乗り心地が向上することを確認した。

2. 空転時の主電動機電流

2.1 試験車両

本研究で使用した試験電車の構成を図1に示す。同電車は1両に電動台車と付随台車があり、電動台車では2台の主電動機が1台のインバータによって並列に駆動される。主電動機は速度センサレスベクトル制御によってトルク制御される。試験電車の主回路構成を図2に示す⁷⁾。

散水試験では、各台車の進行方向の前軸に散水ノズルを設置し、台車毎に毎分4リットルの水量でレール・車輪間に散水した。

計測に使用した車輪の速度や加速度は、車軸端PGセンサ信号から演算して求めた。

走行試験では、図2中のベクトル制御用の電流センサとは別に、新たに各電動機に対し2相分の電流センサを仮設した(図3)。

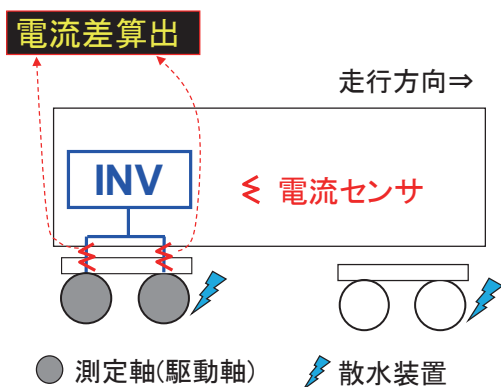


図1 1C2M 試験電車

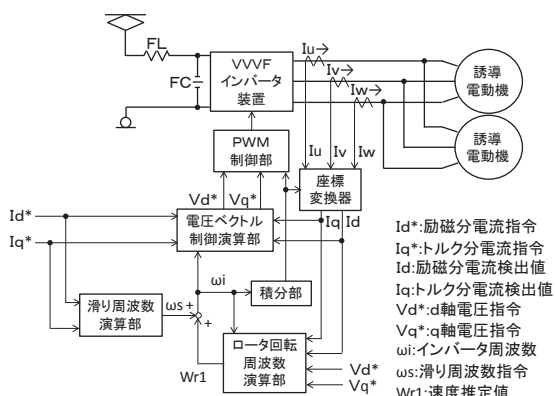


図2 1C2M 主回路構成(速度センサレスベクトル制御)

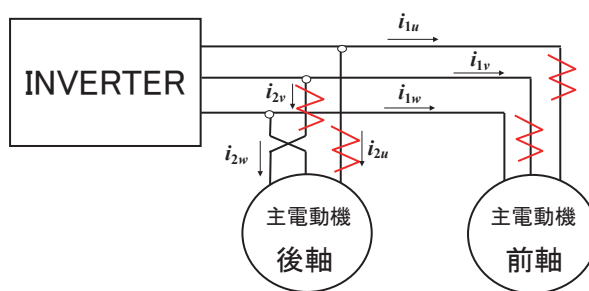


図3 1 電動台車分の主回路構成と電流センサの仮設状況

2.2 1C2M 電車の空転発生状況

試験電車を用いて散水走行試験を実施し、1C2M方式における空転現象を調査した。本試験では加速度検知による空転再粘着制御の動作回数と空転検知直前の電流差の最大値について、109回の空転発生時における状況を調査した。起動加速度は2.5km/h/s、走行速度は0～100km/hとした。トラクション係数(動輪周引張力/軸重)は約0.17であった。台車内では、進行方向に対して、前軸の軸重は後軸に比べて小さくなるため、前軸から空転を開始する傾向にある。これは、力行時には、インバータ出力電流が一定に制御されており、各主電動機の発生トルクはほぼ同じであるのに対して、加速時の軸重移動により前軸のトラクション係数は後軸よりも大きくなるのが要因と考えられる。

109回の空転を調査した結果、前後軸の主電動機間に15A以上の電流差が約90%の割合で加速度検知による再粘着制御が動作するより前に発生することを確認した(図4)。ここで、今回の走行試験では、電流センサ精度と実車走行時の電流差挙動の観点から、空転と判別可能な電流差の下限値を定格電流の約5%に相当する15Aと判断した。

以上より、主電動機間の電流差に着目することで、現状の加速度検知よりも、早く空転の兆候を捉えられる可能性があることが確認できた。

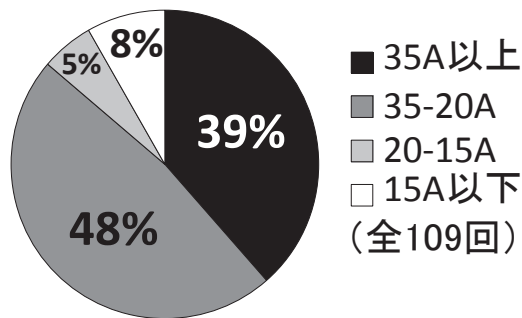


図4 空転検知前の主電動機電流差の発生状況

2.3 速度差と電流差の関係⁴⁾

空転発生時に各軸のすべり角周波数に差が生じると、その差が空転による各軸の速度差となる。

ここで、電動台車の進行方向に対し台車前軸を第1軸、後軸を第2軸とする。空転発生時の各軸の磁束分電流は一定と仮定すると、各主電動機のトルク分電流を用いて(1)式で近似できる。ここで、速度差 ΔV (第1軸速度 V_1 - 第2軸速度 V_2) およびトルク分電流差 Δi_q (第1軸トルク分電流 i_{q1} - 第2軸トルク分電流 i_{q2}) は(2)式と(3)式で示される。

$$\Delta V \cong -\frac{3.6r}{PG} \cdot \frac{r_2}{L_2} \cdot \frac{1}{i_{dref}} \Delta i_q \quad [\text{km/h}] \quad (1)$$

ここで、 r : 車輪半径 [m], P : 極対数, G : 歯車比
 r_2 : 二次抵抗 [Ω], L_2 : 二次インダクタンス [H]
 i_{dref} : 磁束分電流指令 [A]

$$\text{各軸速度の差: } \Delta V = V_1 - V_2 \quad [\text{km/h}] \quad (2)$$

$$\text{トルク分電流の差: } \Delta i_q = i_{q1} - i_{q2} \quad [\text{A}] \quad (3)$$

上記に試験電車の駆動系パラメータを代入すると、トルク分電流差と速度差の関係は(4)式で示される。

$$\Delta i_q \cong -485 \Delta V \quad [\text{A}] \quad (4)$$

各電動機の一次電流ベクトルの大きさ i_{1n} は、電流センサ情報から(5)式を用いて求められる。 i_u, i_v は u 相, v 相電流、 n は第 n 軸を意味する。電流差 Δi は(6)式で示される。

$$i_{1n} = \sqrt{2(i_{u_n}^2 + i_{v_n}^2)} \quad [\text{A}] \quad (5)$$

$$\Delta i = i_{11} - i_{12} \quad [\text{A}] \quad (6)$$

各軸のトルク分電流 i_{q1} と i_{q2} は、各軸の磁束分電流 i_{d_n} は一定であると仮定して(7)式で求められる。

$$i_{q_n} = \sqrt{i_{1_n}^2 - i_{d_n}^2} \quad [\text{A}] \quad (7)$$

2.4 代表的な散水試験結果 (現状)

散水空転試験における、現状の代表的な再粘着制御時の波形例を図5に示す。試験車両は図1と同様である。設計起動加速度 1.6km/h/s 、トラクション係数は約 0.14 であった。加速度 α は、第1軸と第2軸の車輪回転加速度の平均値である。

起動してから速度 20km/h 付近(時刻14秒)から空転が発生し、時刻17秒付近で再粘着制御が動作し、トルク分電流指令 i_{qref} が約 100A 引下げられていることが確認できる。

時刻13.0秒から時刻20.0秒の間の速度差 ΔV と電流差 Δi 、加速度 α (第1軸と第2軸の平均)を図6に示す。

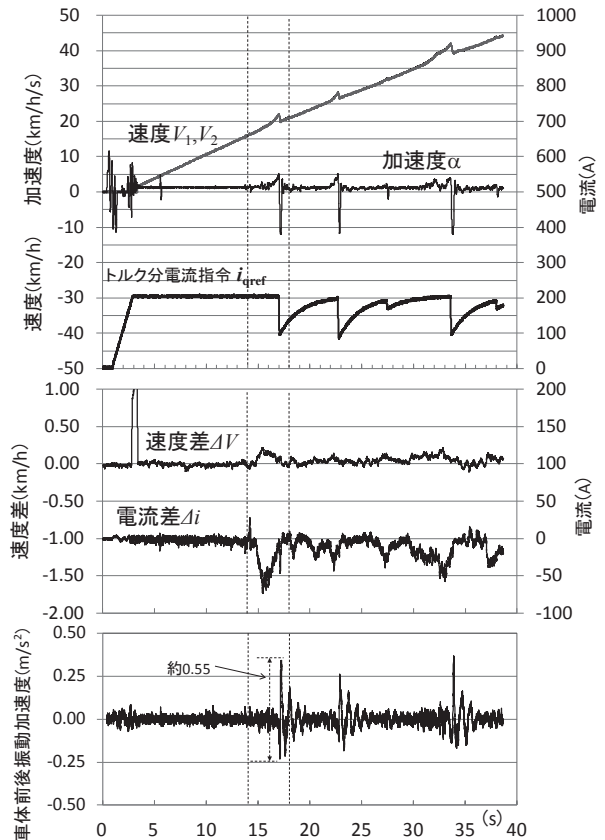


図5 走行試験結果 (現状の例)

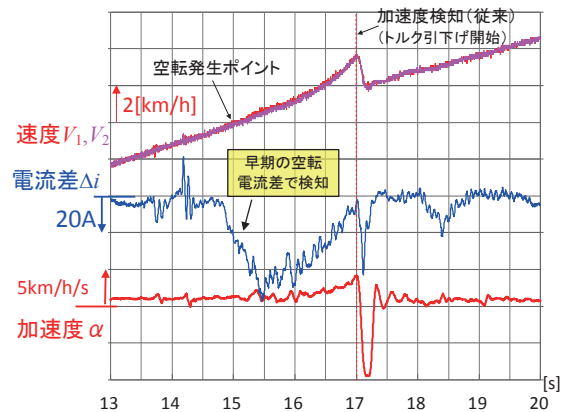


図6 空転発生時の電流差と加速度

時刻15.0秒から電流差 Δi が徐々に大きくなり(第1軸が空転開始)、時刻16.5秒付近では、加速度 α の値が大きくなり(両軸とも空転)、時刻17.0秒で空転再粘着制御が動作して再粘着することが確認できる。時刻17秒付近の車体前後振動加速度(DC成分カット)の最大P-P値は 0.55m/s^2 であった。

各主電動機のトルク分電流値を(7)式から算出し、(3)式によりトルク分電流差 Δi_q を求めて、速度差 ΔV との関係をプロットすると、図7のように(4)式にほぼ一致する。これより、トルク分電流差 Δi_q (各軸の一次電流ベクトルの大きさ)から速度差 ΔV がほぼ推定できることが確認できた。

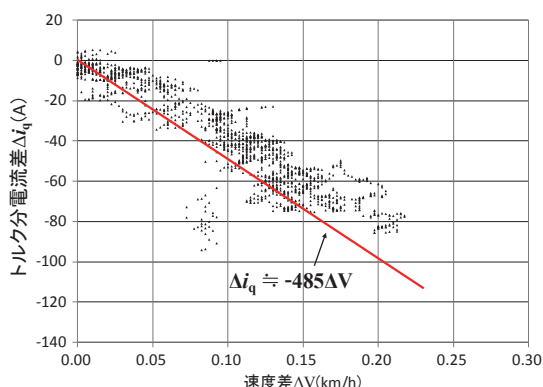


図7 速度差とトルク成分電流

3. 空転を早期に抑制する主電動機制御

3.1 従来制御

本節では、一般的に使用されている加速度検知による再粘着制御方法について簡単に述べる。

速度センサレス電車では、一般的に、2台の主電動機の平均加速度が、列車設計加速度に対して2~3km/h/s程度大きくなると空転と判断し、主電動機トルクを引き下げる。

図8に空転を表す車輪の回転速度と空転検知により動作する主電動機トルクの引下げの様子を示す。空転再粘着制御には様々な方式があるが、本論文では、復帰動作時に粘着力推定値を使用する再粘着制御方法⁸⁾について説明する。

トルク制御の動作順序を以下に述べる。まず、空転検知後に空転が収束すると判断できるまで主電動機トルクを引下げる。その後、一定時間保持（保持時間を設けない場合もある⁹⁾）し、空転検知時に推定した粘着力推定値にむけて、緩やかにトルクを復帰する。次に、一定時間後にノッチ特性により設定されるトルクパタン指令値に復帰する。

空転時における車輪の回転加速度が大きいと、トラク

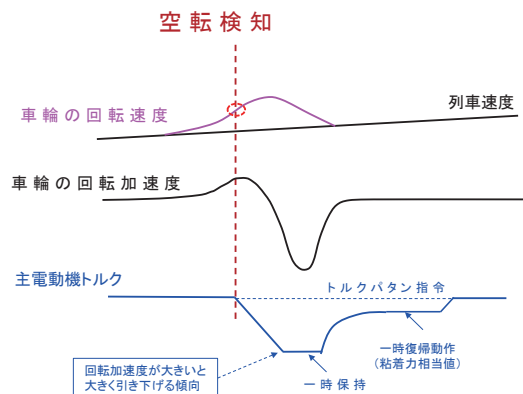


図8 空転時のトルク引下げ動作（従来の再粘着制御）

ション係数（接線力係数）の低下につながる。粘着力の有効活用の観点からは、できるだけ小さな加速度の値で検知して、大きな空転に進展する前に収束させることが望ましい。

3.2 提案制御

本節では、各主電動機電流の情報を用いて、通常の再粘着制御が動作する前に空転を抑制する方法を提案する。電流差による空転検知のブロック図を図9に示す。

走行試験では、各主電動機電流を電流センサで検出し、インバータ制御装置のトルク分電流指令値 i_{qref} をモニタ信号として測定した。これらを利用することで、各軸のトルク分電流を演算することが可能と考えられるが、計測制御装置で演算をする上で(7)式の平方根の中が負になる場合もあったため、試験上の制約から(3)式は制御に用いず、(6)式から求められる電流差 Δi を用いて制御を行った。

電流差 Δi を比較器に通して電流差を検知すると、主電動機トルクを引き下げる制御を実施する。今回の試験電車の主電動機特性からは、(4)式より速度差0.1km/hに相当するトルク分電流差 Δi_q は約48.5Aとなる。この時、電流差 Δi は約43Aに相当し、これを電流差検知の閾値に設定することとした。検知解除の閾値は電流差の波形に含まれるノイズ成分を考慮して33A以下とした。

閾値以上の電流差を検知している間は、トルク分電流指令から200A/sの傾きで最大25A（粘着軸のトルク分電流の増分相当値の約1/2）を目標に引下げ、保持動作（最大保持時間1s）を行う。保持時間が1sを超えると検知解除され、30A/sの傾きで復帰動作が行われる。

この引下げ動作により、粘着軸のトラクション係数は、電流増による増加分が低減されて、電流増加前の値とほぼ同じになると考えられる。これにより、トルク分電流値を高く維持しつつ、2軸が同時に空転に至ることを防止し、加速度検知が動作する前に空転を抑制することが期待できる。

電流差検知した後のトルク指令の動作例を図10に示す。図中には、通常の再粘着制御が働いた場合の動作例も破線で記述した。電流差検知で空転が抑えられなかった場合には、加速度検知で再粘着制御を実施する。今回の試験では、電気機関車用に開発して効果を確認した再粘着制御方法¹⁰⁾を使用した。

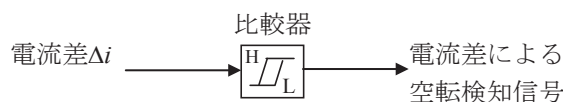


図9 電流差検知のブロック図

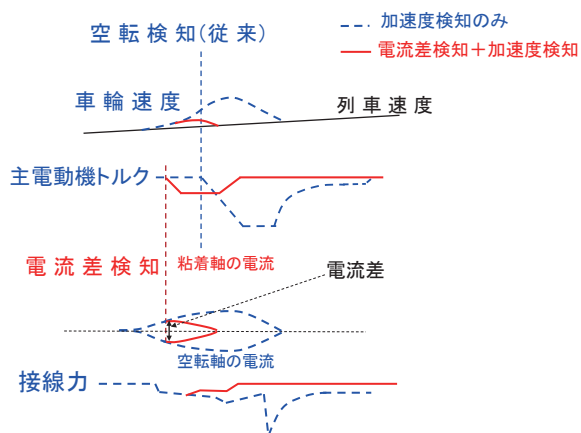


図 10 空転時のトルク指令動作例

4. 現車試験

4.1 試験方法

提案制御方法の性能を検証するため、図 11 のように 3 両編成の試験電車をを用いて散水走行試験を実施した。最後尾の 1 両 (0.5M) 分を主回路開放し、1M2T の MT 比で、先頭軸から 2 箇所散水試験 (散水量は 1 ノズルあたり 4l/min) を行った (図 11)。編成内の電動車比率は 1M2T 相当 (3 両編成電車) であった。

測定対象軸は先頭車両 (1 両目) の第 3 軸と第 4 軸とした。また、試験地点は複数設けた。

提案制御を実施するため、外部制御装置からインバータ制御装置に電圧信号 (トルク引下げ信号) を入力して実施した (図 12)。制御サンプリングタイムは 1ms とし、制御に使用する加速度情報は車軸端 SG センサ信号から演算して求めた。



図 11 試験方法

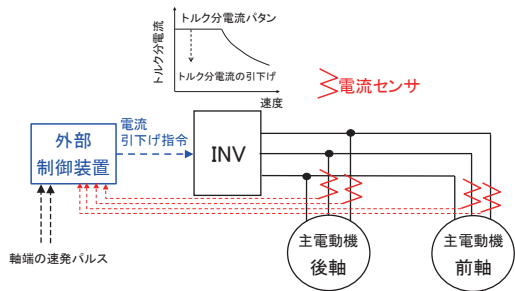


図 12 再粘着制御用の外部制御装置

4.2 試験結果

従来制御では、同一試験地点で、試験終了速度まで空転が継続的に発生している試番を比較対象とした。試験条件の制約から電流差検知機能は速度 40km/h まで有効とし、それ以降の速度域では加速度検知による再粘着制御のみ機能することとした。

提案制御の試験結果の例を図 13 に示す。時刻 14 秒から空転による電流差が生じ、電流差検知による小さなトルク分電流指令 i_{qref} の引下げにより、空転が抑制されていることが確認できる。ほぼ同じ走行箇所 (散水空転試験区間の線路条件には直線と 10%勾配が含まれている) で現状と提案制御を比較した結果、起動から速度 40km/h までの列車加速度は 5% 以上向上する結果 (走行区間 5 箇所での平均値) が得られた。

車体前後振動に関しては、乗り心地レベル L_T 値¹¹⁾ による乗り心地評価を行った。 L_T 値とは、振動加速度波形に人間の振動感覚特性に基づく等感覚曲線による重みづけを施し、ある時間幅 T におけるその波形の実効値 (RMS) に基づき算出される指標であり、値が小さいほど乗り心地が良いとされる。

本来、 L_T 値は 3 分 ± 2 分程度の安定した走行状態における振動データを評価するものであるが、特定箇所における振動乗り心地評価として、短時間のデータを用い

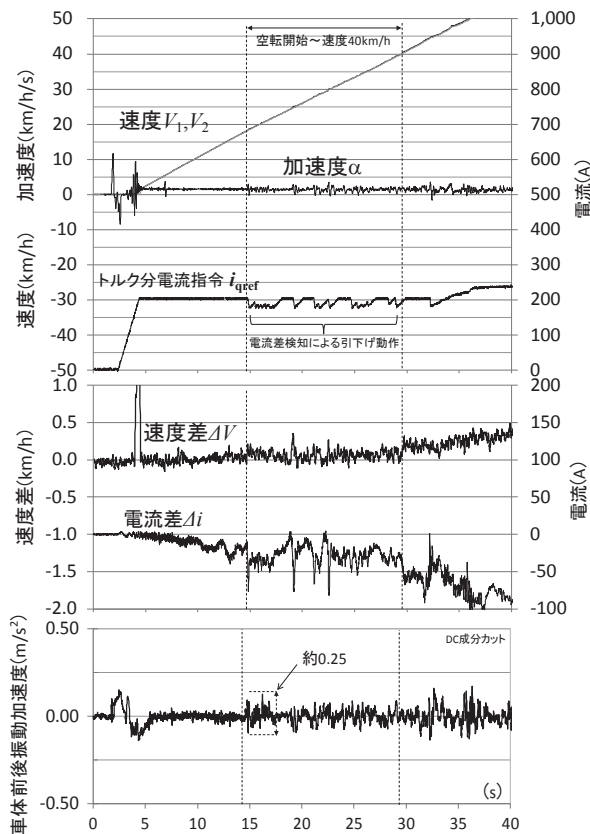


図 13 走行試験結果 (開発した提案制御)

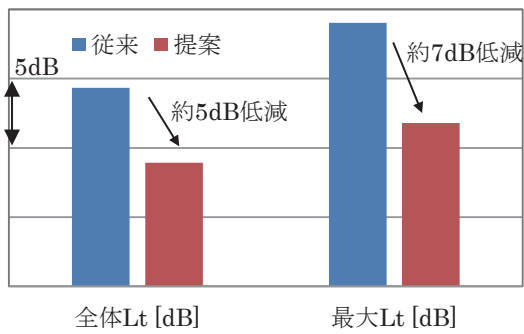


図 14 車体前後振動の乗り心地評価

で計算した L_T 値（短時間 L_T 値）を参考値として用いる場合もある。本件でも従来制御による振動乗り心地との相対比較を、これに準じて行うこととした。

力行開始 4 秒後から速度 40km/h 到達時までを評価区間とし、 $T=$ 評価区間全体とした全体 L_T 値、および $T=5$ 秒とし L_T 値を逐次計算した際の最大値である最大 L_T 値を用いた。従来制御（図 5）と提案制御（図 13）の結果を図 14 に示す。

従来制御の最大 L_T 値は図 6 で示される時刻 17 秒付近でのトルク引き下げに伴う急峻な前後振動によるものである。また、従来制御の試番では図 5 の通り時刻 17 秒付近および 22 秒付近で 2 回のトルク引き下げが生じている一方、提案制御の試番では急峻な前後振動は生じず、従来制御に対して、全体 L_T 値は約 5dB 低減し、最大 L_T 値は約 7dB 低減する結果を得た。また、空転発生後の車体前後振動加速度の観点からは、最大 P_P 値が 0.3m/s^2 程度に低減され、前後振動を知覚しにくいほど乗り心地が向上することを確認した。

5. おわりに

2 台の主電動機を並列に接続して駆動するインバータ制御電車において、各主電動機の一次電流ベクトルの大きさの差に着目して、早期に空転を抑制する空転抑制方法を提案した。

本論文では、1C2M 駆動方式の速度センサレス電車を対象として散水走行試験を実施した結果、列車加速度の向上と車体前後振動の低減による乗り心地向上が確認できた。この結果を受け、本方式は、JR 西日本 323 系電車に採用されている。

謝 辞

数年にわたる現車試験にご協力頂いた東芝、東洋電機製造、日立製作所、三菱電機の関係各位に謝意を表す。

文 献

- 1) 恩田昇治, 伊東正尚, 戸田伸一, 牧野友由, 結城和明:「速度センサを有しないベクトル制御の車両への適用」, 第 39 回鉄道サイバネ・シンポジウム, 517, 2002.11
- 2) 石野勲, 嶋田基巳, 渡邊大輔:「ロバスト粘着制御」, 第 41 回鉄道サイバネ・シンポジウム, 512, 2004.11
- 3) 門脇悟志, 大石潔, 宮下一郎, 安川忍:「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一方式」, 電学論 D, Vol.127, No.8, 2007
- 4) 渡邊朝紀, 山下道寛:「電気鉄道車両の速度センサを用いない空転滑走・再粘着制御」, 電学論 D, Vol.123, No.5, 2003
- 5) 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:「速度センサレス並列誘導電動機駆動電車の主電動機電流情報を用いた空転抑制方法—現車試験結果—」, 電気学会 産業応用部門大会 2015
- 6) 島田直人, 山中章広, 北村琢也, 山下道寛, 三木真幸, 大江晋太郎:「空転再粘着制御の性能向上 —早期の空転収束検知と電流差検知を用いた乗心地の改善」, 第 52 回サイバネ・シンポジウム, 501, 2015 年 11 月
- 7) 三菱電機技報, Vol.78, No.12, 2004
- 8) 山中章広, 渡邊朝紀, 松岡成康, 今村洋一:「粘着力推定を行う空転再粘着制御の通勤形電車への適用」, 電学論 D, Vol.119, No.6, 1999
- 9) 飯田秀樹, 喜多純子, 熊野昌義, 菊池高弘:「ファジー粘着制御方式の開発」, 平成 7 年電気学会産業応用部門全国大会, 197
- 10) 山下道寛, 添田正:「インバータ制御機関車の起動けん引力を向上する空転再粘着制御方法」, 鉄道総研報告, Vol. 30, No.11, 2016
- 11) 谷藤克也: 鉄道車両の乗心地管理と強制振動計算法に関する研究, 鉄道技術研究報告 No. 1321, 1986