

平成 30 年 6 月 24 日現在

機関番号：13102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13924

研究課題名(和文)いつでも調整できる空転滑走再粘着制御系を有する安全な通勤電車

研究課題名(英文) Safety commuter train having anytime selftuning readhesion control system

研究代表者

大石 潔(OHISHI, KIYOSHI)

長岡技術科学大学・工学研究科・教授

研究者番号：40185187

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：通勤電車の空転滑走再粘着制御系は、高い専門知識を持つ熟練技術者が調整したトルク指令パターンに接線力の推定値を反映させてトルク制御する。しかしながら、近年、熟練技術者は減少しているため、熟練技術者に頼らないで、専門の鉄道技術者であればいつでも調整できる空転滑走再粘着制御系を開発することが望ましい。

本研究では、空転及び滑走時に、車両と動輪の間のすべり加速度の力学的最適値を求めてトルク制御する方式と、電気ブレーキ失効時のフラットを防止する電空協調制御の滑走再粘着の方式を組合せる。その結果、専門の鉄道技術者がいつでも調整できる空転滑走再粘着制御系を構成した。これより、安全な通勤電車を目指した。

研究成果の概要(英文)：Generally, anti-slip and anti-skid readhesion control system of commuter train has the torque control system reflecting the torque reference pattern based on the estimated tangential force value, which is adjusted the special knowledge engineer. However, the special knowledge engineer decreases in recent years.

In order to overcome this problem, this research project proposes a new anti-slip and anti-skid readhesion control system. The proposed system is the cooperation control system of the two proposed torque control systems. The one is the torque control system based on the dynamic optimal value of the slip acceleration between the vehicle and the driving wheel. The other one is the torque control system which prevent the flat phenomenon of electric brake lapse. As a result, this research project has developed a new anti-slip and anti-skid readhesion control system which can be adjusted anytime without depending on the special knowledge engineer.

研究分野：モーションコントロール、電気鉄道、パワーエレクトロニクス

キーワード：モーションコントロール 制御工学 電気鉄道 パワーエレクトロニクス

1. 研究開始当初の背景

電気鉄道を安全且つ快適に走行する技術開発は重要な課題である。その実現のために、以前より外乱オブザーバによる接線力推定に基づく空転滑走再粘着制御による高粘着制御を実現してきた。空転滑走再粘着制御系は、高い専門知識を持つ熟練技術者が調整したトルク指令パターンに接線力の推定値を反映させてトルク制御する。しかしながら、近年、熟練技術者は減少しており、また海外への輸出等を考えると、熟練技術者に頼らないで、専門の鉄道技術者であればいつでも調整できる空転滑走再粘着制御系を開発することが理想である。

電気鉄道の空転滑走再粘着制御において、接線力の値を検出してフィードバックすることは、外乱オブザーバにより初めて実現された。外乱オブザーバによる空転再粘着制御では、トルク指令パターンに接線力推定値を用いてトルク制御を行い、最高粘着点の95%以上で空転再粘着を実現する。従来のトルク指令パターンは、高い専門知識を持つ熟練技術者の実車両試験での調整で決められていた。

2. 研究の目的

本研究では、車両と動輪の間のすべり加速度の最適値を力学的解析アルゴリズムで求めることにより、熟練技術者に頼らずに、専門の鉄道技術者がいつでも所望の応答が得られるように調整できる空転滑走再粘着制御系を開発し、安全で快適な通勤電車を実現する。

3. 研究の方法

研究代表者の大石は研究統括を行うとともに、本研究課題の主題を実現する。具体的には、「すべり加速度に基づく空転滑走再粘着制御」を構成し、それを主体に且つ他のグループの2つの課題も含めて、理論構築、数値解析、模擬実験装置による実験、性能評価のすべてを、連携研究者の大西(慶應義塾大)と共に実施する。

研究分担者の宮崎(長岡技科大)と横倉(長岡技科大)は「電空協調アンチロック制御」を構成し、その理論構築、数値解析、模擬実験装置による実験、性能評価を行い、アンチロック制御方式の開発を行う。

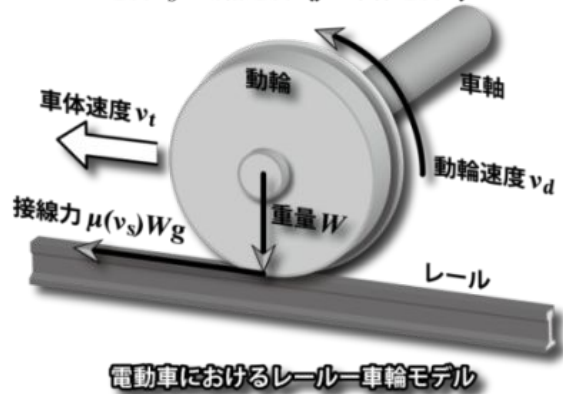
研究分担者の和田(長岡技科大)は「最適すべり加速度解析」を構成し、空転滑走再粘着制御を行う際のすべり加速度の最適値を、力学的解析により求めるアルゴリズムを開発する。理論構築、数値解析、模擬実験装置

による実験、性能評価を行って、本アルゴリズムを確立する。

4. 研究成果

図1に示す車両の1動輪モデルにおいて、すべり速度と接線力の粘着特性は、図2のように、ピーク点(最高粘着点)近傍でのトルク制御が再粘着制御の理想である。このピーク点を超えると、空転及び滑走となる。

$$\text{スリップ速度 } v_s = \text{動輪速度 } v_d - \text{車体速度 } v_t$$



電動車におけるレール-車輪モデル

図1 動輪の接線力のイメージ

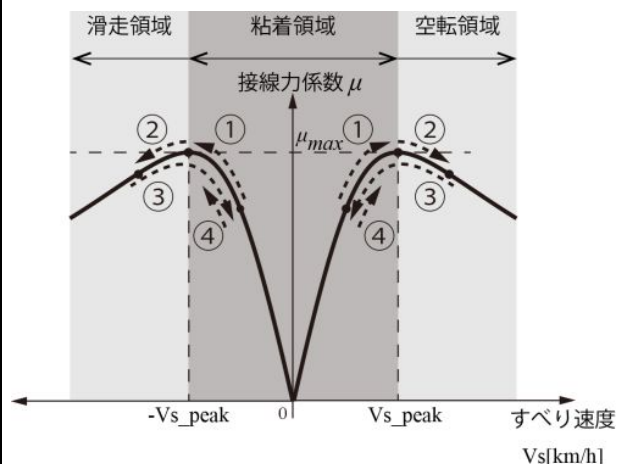


図2 動輪とレールの粘着特性

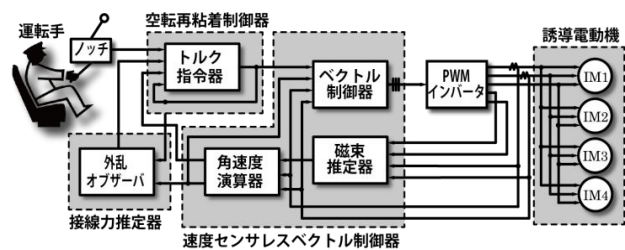


図3 空転滑走再粘着制御システム

図3の外乱オブザーバによる空転再粘着制御では、図4のトルク指令パターンに接線力推定値を用いてトルク制御を行い、最高粘着点の95%以上で空転再粘着を実現する。従来のトルク指令パターンは、高い専門知識を持つ熟練技術者の実車両試験での調整で決められていた。

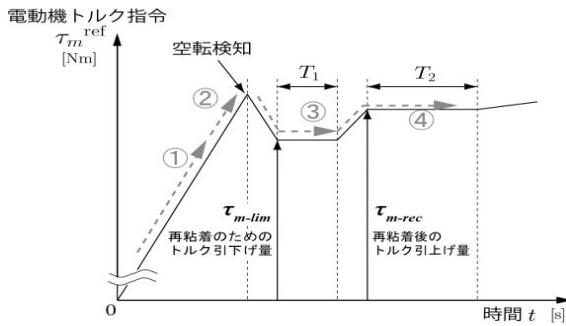


図4 空転再粘着制御のトルク指令パターン

図1の車輪モデルでその物理現象を考えると、空転滑走再粘着制御を確実に実行する電動機トルク指令は、接線力と慣性力(加速力)との和の値より小さい値になる。慣性力は車両加速度で決まるので、この車両加速度を適切な値にすると、空転を生じない慣性力が決まる。本研究では、空転検知をした瞬間の車両加速度に、所望の動輪加速度で空転を再粘着できるすべり加速度(図5参照)を加算する。このすべり加速度指令は、図5から定義できる。

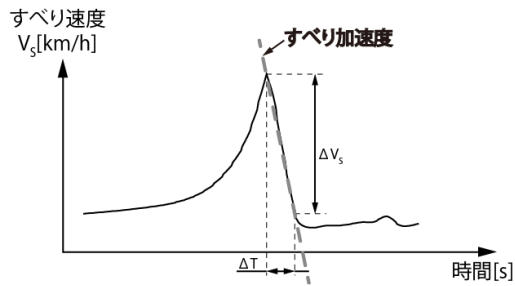


図5 再粘着制御時のすべり速度応答

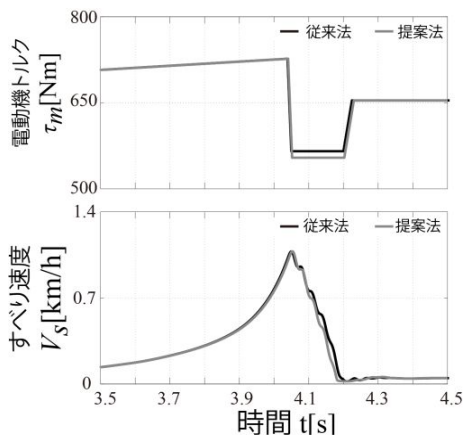


図6 提案法と従来法の再粘着制御応答

図6に示す様に、従来法は、高い専門知識を持つ熟練技術者の実車両試験での調整で決められていた係数に、接線力を乗じて、トルク制御をしてきた。本提案法は、所望の慣性力(加速力)となるすべり加速度指令の最適値を、実車両の試験データの力学的解析により求め、トルク制御することにより空

転滑走再粘着を実現している。どちらも所望の再粘着制御性能を有している。

図7に模擬実験装置の全体構成を示す。この実験装置を用いて、本研究で提案する「熟練技術者に頼らずに、専門の鉄道技術者がいつでも所望の応答が得られるように調整できる空転滑走再粘着制御系」の有効性を確認する。

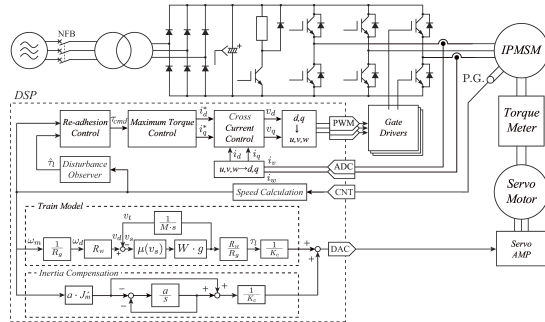


図7 模擬実験装置

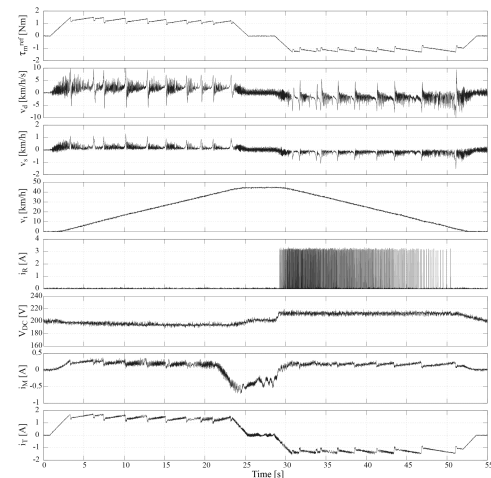


図7 従来法の再粘着制御の実験結果

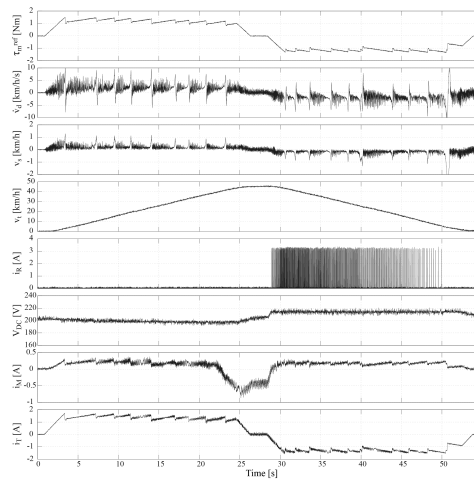


図8 提案法の再粘着制御の実験結果

図7は高い専門知識を持つ熟練技術者によって調整されたトルクパターンによる再粘着

制御の実験結果である。これに対して、図8は提案法による粘着制御の実験結果である。図7と図8を比較して、ほぼ同一の性能を得ることができていることを確認した。

以上により、専門の鉄道技術者がいつでも所望の応答が得られるように調整できる空転滑走再粘着制御系を開発できた。安全で快適な通勤電車の実現を目指せることが立証された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 6 件)

- 1) H. Haga, K. Sayama, K. Ohishi, T. Shimizu: "Fine Voltage Control Based on Frequency Separation Two-Degrees-of-Freedom Control for Single-Phase Inverter", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.5, No.6, pp.413-421 (2016)
- 2) K. Abe, H. Haga, K. Ohishi, Y. Yokokura: "Current Ripple Suppression Control Based on Prediction of Resonance Cancellation Voltage for Electrolytic-Capacitor-Less Inverter", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.6, No.1, pp.1-11 (2017)
- 3) K. Matsuura, Y. Akama, K. Abe, K. Ohishi, H. Haga, I. Ando: "Fine Three-Phase Current Reconstruction based on Calculating the Phase-Shifted Voltage Reference Using Only the DC Current Sensor of an Inverter and Its Application to a PM Motor Drive", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.6, No.1, pp.58-65 (2017)
- 4) K. Abe, H. Haga, K. Ohishi, Y. Yokokura: "Fine Current Harmonics Reduction Method for Electrolytic Capacitor-Less and Inductor-Less Inverter Based on Motor Torque Control and Fast Voltage Feedforward Control for IPMSM", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 64, No. 2, pp. 1071-1080, Feb. 2017.
- 5) R. Takahashi, K. Ohishi, Y. Yokokura, H. Haga, T. Hiwatari: "Stationary Reference Frame Position Sensorless Control Based on Stator Flux Linkage and Sinusoidal Current Tracking Controller for IPMSM", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.6, No.3 pp.181-191 (2017)
- 6) K. Abe, H. Haga, K. Ohishi, Y. Yokokura: "Direct DC-link Current Control Considering Voltage Saturation for Realization of Sinusoidal Source

Current Waveform without Passive Components for IPMSM Drives," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.65, No.5, pp.3805-3814(2018)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等なし。

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

大石 潔 (OHISHI KIYOSHI)  
長岡技術科学大学・工学部・教授  
研究者番号: 40185187

##### (2) 研究分担者

和田 安弘 (WADA YASUHIRO)  
長岡技術科学大学・工学部・教授  
研究者番号: 70293248

宮崎 敏昌 (MIYAZAKI TOSHIMASA)  
長岡技術科学大学・工学部・准教授  
研究者番号: 90321413

横倉 勇希 (YOKOKURA YUKI)  
長岡技術科学大学・工学部・助教  
研究者番号: 70622364

##### (3) 連携研究者

大西 公平 (OHNISHI KOUHEI)  
慶應義塾大学・理工学部・教授  
研究者番号: 80137984