

- 博士論文（要約） -

電気鉄道の自動列車運転制御による

省エネルギー運転理論の実証研究

(Theoretical and Experimental Research on Energy-Saving  
Automatic Train Operation for Electric Railway)

平成 28 年 12 月 1 日 提出

指導教員 古関 隆章 教授



大学院工学系研究科 電気系工学専攻

博士課程 37-147068

渡邊 翔一郎

## 内容梗概

本論文は世界的に需要が高まっている電気鉄道の環境性能を向上させることを目的に、運転理論に基づく鉄道車両の自動列車運転装置を活用した列車運転制御法を論じるものである。

鉄道は高い陸上交通輸送能力を有し、また環境親和性に優れている。いま環境問題が世界的に懸念される中、鉄道は持続可能な地球社会実現に向けて期待される交通システムのひとつである。特に電気鉄道は駆動効率が高く、電力消費の場面でCO<sub>2</sub>や有害ガスなどの排出がないため、都市人口率が増加傾向にある海外諸国で新規建設が進められている。電気駆動系交通システムは我が国においても普及が進んでおり、近年では労働人口減少にも対応できる自動運転が積極的に研究開発されている。鉄道車両の自動運転は自動列車運転装置(ATO)として既に導入実績があり、自動列車運転装置は手動運転に比べて高い応答速度で正確に運転でき、その運転制御パターンを再現性良く実現可能である。そのため理論検討に基づく制御パターンを簡潔に実装することができ、さらに従来の手動運転では困難とされていた省エネルギー運転制御法も実現可能となった。これらの背景から、電気鉄道の高度な運転制御法を活かした省エネルギー化の研究は重要な役割と期待を担っている。

列車の運転制御法を改良するときには、鉄道事業者の定める運行計画が最も厳しい制約となる。そのため基準時間内に次駅に到着することを前提に運転制御法を工夫するには駅間走行時分を適切に活用する必要がある。そこで本研究では駅間走行時分を安全に確保するためにジャーク制御時間を短縮する手法を考案し、提案する運転制御法に割り当てる時分を得た。これにより電気機器の効率を意識したノッチ選択と惰行運転の積極的導入および機械ブレーキをできるだけ立ち上げないためのブレーキ制御法を考慮した自動列車運転装置の設計ができるようになった。さらに自動列車運転装置の性能を活用すれば秒オーダーの精緻な駅間走行時分の調整ができるようになることから、始発駅から終着駅までの各駅間に割り当てられている駅間走行時分を理論計算に基づいて最適に配分し省エネルギーな運行計画を導出した。

列車の消費電力量は駅間走行時分の影響を強く受ける。そのため提案法の省エネルギー効果を適切に評価するためには、理論検討で導出した所望の駅間走行時分と実測の駅間走行時分を合致させなければならない。本研究では駅間走行時分調整法を考案し、現場の限られた試験時間内で迅速に自動列車運転装置の制御パターンを調整できるように補正データベースを構築し、さらに実験の結果が数秒ずれていても後から数値計算で電力量を補正できるようにした。

本研究では提案する運転制御法において空転・滑走問題も含む安全性に関わる実務制約を考慮している。理論検討を含めてそれらの有用性を実験で評価するために、試験フィールドとして自動列車運転機能を備えているリニア地下鉄を選定した。地下鉄は天候をはじめ

とする外乱が少ないため平等な条件下で比較評価することができ、問題点を簡潔明瞭に整理することができる。また自動列車運転装置は再現性良く列車を運転制御できるため、提案法の効果を初段階で評価するのに適している。リニアモータ駆動鉄道は一般的な回転モータ駆動鉄道と異なり車輪と軌道の粘着に依存せず推力および制動力を得ることができる。そのため空転・滑走の問題がなく、平均加加速度の制限を適切に緩和するジャーク制御を正確に実装して評価することができる。

提案法をリニア地下鉄で評価するためにはリニアモータ駆動鉄道の計算モデルを構築する必要がある。しかしリニアモータ駆動鉄道は先行研究の例が少なく、回転モータ駆動鉄道と異なる電動機特性や磁気吸引力に起因する走行抵抗特性を有するため、従来の運転理論の単純な適用では精度の良い計算モデルを構築することが難しいという問題があった。そこで本研究では車両の電気機器駆動効率の速度依存性を実験的に把握するために予備試験を行い、リニアモータ駆動システムの速度と推力を変数に持つ効率特性を取得した。これにより列車の消費電力量に強く影響する車両の電気機器効率特性を導出し、リニアモータ駆動鉄道の運転曲線と消費電力量の計算法を確立した。さらに、これらの特徴を考慮して消費電力量を最小化する最適運転曲線を動的計画法により導出した。

提案法を自動列車運転装置に実装し、省エネルギー効果の実証試験を行った。事業者の定める運転計画はそのままに、従来の列車制御による消費電力量と比較すると、提案法により16.2%の省エネルギー効果が得られた。そして先行研究で実証例のない駅間走行時分の配分最適化の実証試験では理論予測とほぼ同等の効果を示し、先の提案法の有用性を実証するとともに、本研究の提案法の総合的な成果として17.2%まで省エネルギー効果を高めることができた。これらの実証試験で、自動列車運転装置の制御パターンの実装調整作業とその成功実績を通じて、駅間走行時分調整法の有用性が明らかになった。

本研究の重要な成果は10%を超える省エネルギー効果だけでなく、提案する列車運転制御法がソフトウェアの改良のみで実現できたことである。すなわち、車両機器はそのままに制御パターンのみを改良するため改装費用を抑えることができる。そして制御器設計に実務的制約を適切に考慮することで、列車走行の安全性を脅かすことなく走行できる。これらの成果と経験を用いれば、省エネルギー自動運転システムの早期実用化が可能となる。

本研究で活用した自動列車運転装置の制御技術は、今後の我が国の鉄道車両への普及拡大が期待される技術である。さらに鉄道に関する技術的経験の蓄積が少ない海外諸国にとっても、自動列車運転技術は鉄道の運行を容易にし、新規導入の手助けとなる。すなわち、本研究の提案法を適用すれば小さな実装コストで省エネルギー化を図り、運行コストを本質的に小さくできるため、内外の鉄道システムの省エネルギー技術の展開にも貢献できる。さらに本研究の成果は、リニアモータ駆動鉄道のみならず電気鉄道一般、新交通システム、電気自動車などの電気駆動系交通システムに広く応用可能である。

## **Abstract**

This research focuses on electric railways whose demand is increasing in the world, and discusses the train control methods utilizing Automatic Train Operation (ATO) of the rolling stocks based on the theory of efficient train operation in order to improve its environmental performance.

Railway provides high transportation capability and is ecologically friendly. The world is facing significant environmental problems, and railway is an eco-friendly transportation system and is expected to achieve sustainable society. Especially, electric railway has high performance with efficient traction and has no local emission of CO<sub>2</sub> or harmful gas. For these reasons, new electric railroads are being constructed in countries with rapidly expanding urban populations. Electric transportation systems are also becoming popular in Japan and recently automatic operation systems are studied extensively to facilitate ever-smaller working population. ATO is already installed in some railway cars and it can provide high responsivity and accuracy compared with manual operation. This high performance can allow railway cars to be operated high repeatability of running profiles. It is simple to install running profiles based on theoretical design of ATO system and ATO can perform the energy-saving control methods which are difficult to achieve by manual operation. From these backgrounds, the study of energy-saving operation methods utilizing high control performance in electric railway has important future prospects.

When the operation control design of railway cars is improved, railway scheduling, determined by railway operator, is the most severe constraint. The running time should be used accordingly to improve train operation control based on the constraint of reaching the next station within scheduled running time. In this research, the method of reducing the jerk regulation time was proposed in order to get time to be dedicated to the following energy-saving train operation. The ATO can be designed by proposed methods that consider intentional selection of efficient notches, possibly long coasting and braking control with power limitation for avoiding mechanical braking. Furthermore, energy-saving scheduling is proposed that is improved by optimization to distribute a running time of inter-station times between two stations by keeping total traveling times between starting and terminal stations constant, and running time can be adjusted in the order of seconds by utilizing ATO control in response to practical request from my partner railway operator.

The energy consumption of railway cars strongly depends on the running time. Therefore, the energy-saving effect must be evaluated under a strict control of constant running time. This research proposes the adjusting method of running time with correction database to enhance control patterns of ATO by field experiment in short time. However, the strict running time control was not necessary perfect so that an appropriate numerical correction was applied to my measured data so that the running

time may be identical to initial time planning for fair comparison among different cases.

In this research, practical constraints including wheel slip and slide problems are considered. A linear metro equipped with ATO system is selected as field experiment to evaluate the proposed theoretical methods. Subway has no disturbance such as weather and on-track tests are evaluated on equal conditions. In addition, it is suitable for initial evaluation of effects of proposed methods because ATO can be operate railway cars with high repeatability. Linear motor trains have thrust and braking independent of wheel-rail contact. This is a substantial advantage of linear trains in comparison with ordinary trains with rotary traction motors whose acceleration/deceleration depends on rail/wheel adhesion. Therefore, the proposed enhancement of average jerk was inherently easy in my case study.

The calculation model of linear motor trains should be developed in order to evaluate proposed operation method in linear metro. However, previous researches about linear motor trains are not much. Furthermore, it is difficult to develop a calculation model with high accuracy based on applying conventional theory because linear induction motor has characteristic property and running resistance due to magnetic attractive force, and these are different from rotary motor. In this research, speed dependency of electric drive efficiency in railway cars are measured in preliminary experiments and relationships between speed, torque and efficiency of the linear motor car have been described. The electric drive efficiency which strongly effects energy consumption of railway cars is analyzed from these experimental results and the calculation methods of speed profiles and energy consumption are developed. Furthermore, optimal speed profiles which minimize energy consumption in linear motor train is analyzed based on these characteristic properties.

The proposed operation methods are installed in ATO system and energy-saving effect is evaluated by experiments. The results based on proposed methods allow energy saving by 16.2 % compared with conventional running operation under same scheduling, determined by railway operator. The results based on proposed operation methods and scheduling which optimize running time distribution demonstrate for the first time in in the world, the same energy-saving effect compared with theoretical calculation results and usefulness of proposed methods. The total energy-saving effect by the proposed operation methods and scheduling was 17.2% in these experiments. These experiments also show the usefulness of the adjusting method of running time through the work of adjusting control pattern of ATO in the field and the record of success.

The important result in this paper is not only energy-saving effect over 10 % but also the fact that the proposed train operation control methods are designed by only software improvement. The installing cost of these proposed methods in ATO can be kept small because control patterns are only improved and change of electric equipment of cars is not required. These experimental results show the safety in operation without dangerous security risk because practical constraints are considered in ATO design. These results and experiences contribute to early practical realization of energy-saving ATO system.

The control technology of ATO system which is utilized in this research is expected to become popular for railway cars in Japan. This technology also contributes towards helping countries which lack accumulated technical experience of railway operation to install new railway systems. The proposed methods in this paper can save energy with low cost and reduce operational cost in essential. For these reasons, proposed methods contribute towards technology expansion as an energy-saving railway system for not only Japan but also other countries. The results of this study can be applied not only for linear motor trains but also for electric railway, new transportation systems, electric vehicle and electric drive transportation systems.