

遠隔監視データを用いた 電気転てつ機と軌道回路の状態推定手法

遠山 喬* 潮見 俊輔*
押味 良和* 佐藤 輝空*

Methods for Estimating States of Electric Point Machines and Track Circuits
Using Remote Monitoring Data

Takashi TOYAMA Shunsuke SHIOMI
Yoshikazu OSHIMI Terutaka SATO

Despite the rapid development of sensing technology and data storing technology for remote monitoring of signaling, stored big data is not utilized effectively. One cause is that the big data contains little or no reproducible data on the failure or malfunction. We have conducted remote monitoring for about one year and simulated the failures of equipment for remote monitoring of electric point machines and track circuits, and have developed methods to estimate their state as a result. The proposed method of electric point machines is characterized by focusing on the peak current and the switching time, and the proposed method of track circuits is characterized by focusing on the harmonic analysis.

キーワード：遠隔監視，モニタリング，電気転てつ機，軌道回路，状態推定

1. はじめに

信号設備の検査効率化や障害時のダウンタイム短縮を目的として、信号設備の遠隔監視（リモートモニタリング）を実施する例が増えている。センサや通信機器の高性能・低価格化に伴い、高精度で大量のデータの取得・蓄積技術が進展する一方、蓄積データの活用方法が限定的であるという課題がある。

そこで、信号設備のうち列車の安全・安定運行に直結し、多くの鉄道事業者で使用されているNS形電気転てつ機と商用周波数軌道回路を対象に、設備状態を推定する手法の研究を行った。本稿では、これらの提案手法について報告する。

2. 信号設備の遠隔監視における課題

信号設備には高い安全性が求められるため、信号設備は、異常発生時に直ちに安全側状態に遷移・固定されるよう設計されている。特に、電子化された信号設備は冗長化により高い信頼性を確保している。しかし、電気転てつ機や軌道回路については、冗長化が困難、あるいは冗長化の効果が十分に期待できないという課題がある。このため、遠隔監視データから電気転てつ機や軌道回路の障害の予兆を検出できる技術が求められている。

一方で、遠隔監視データの多くは正常時のデータであ

り、信号設備の異常時のデータは極めて少ないことが課題として挙げられる。また、観測された異常時のデータが一般化可能なものであるかも明確ではない。このことは、2010年代以降、発展・普及しているデータ駆動型の人工知能のアプローチについて慎重に検討すべきことを暗示している。

そこで、本研究においては、約1年間の営業線設備の遠隔監視を行い、さらに、それを補完・補強する異常模擬実験を実施した。

3. 電気転てつ機の状態推定手法

3.1 電気転てつ機の状態監視項目

国内で用いられる一般的な電気転てつ機の状態監視装置の測定項目と評価項目を表1に示す。モータ電流や電圧は信号機器室に端末を設置する形態、電気転てつ機内

表1 電気転てつ機の一般的な状態監視測定・評価項目

測定項目	評価項目	測定方法	備考
モータ電流	最大転換電流	電流センサ (CTなど)	転換動作中の区間を定める必要がある
	平均転換電流		
	転換時間		
モータ電圧	転換トルク	トランス (PTなど)	電圧、電流から算出
鎖錠かん変位	鎖錠かん変位	変位センサ (磁気式、 光電式) ロック狂い 検出器	定位と反位を測定 ロック狂い検出器はしきい値超過を検出

* 信号・情報技術研究部 信号システム研究室

に端末を設置する形態に共通した測定項目である。一部の状態監視装置では、光電式や磁気式のセンサによる鎖錠かん変位の測定を行っている。また、一定以上の変位を検出する光電スイッチを用いて鎖錠かんの移動を検出するロック狂い検出器を備えるものもある。

これらの測定結果に基づき、転換動作開始から終了までの転換時間、転換動作中の電流の最大値や平均値、転換電流から推定した電気転てつ機の特定の回転軸のトルク、転換動作後の鎖錠かんの位置が算出される。

3.2 平常データの分析

電気転てつ機の状態監視装置で一般的に測定される、転換電流や転換時間と鎖錠かん変位、および転換電流等の測定によって状態変化の検出が期待される分岐器の転換負荷について、営業線3箇所の計36,957回の転換動作に対する平常データの分析を行った。

平均転換負荷の推移を図1に示す。分岐器による差異はあるものの、転換負荷は各分岐器ともに安定して推移し、測定箇所で使用されていたNS-A形電気転てつ機およびNS-AM形電気転てつ機の定格転換力に対して、負荷は10%～30%程度に留まった。転換電流の平均値および最大値についても同様に季節変動がない安定推移の傾向を示した。転換負荷と電流等との関係性については、平常データの分析から傾向を得ることが難しいため、3.3節に述べる異常模擬試験により得ることとした。

鎖錠かん変位については、図2に示すように、分岐器によって、近隣のアメダス観測点の気温との相関がある箇所と、相関がない箇所がそれぞれ存在した。後者のような箇所においては、気温等から鎖錠かんの移動傾向の

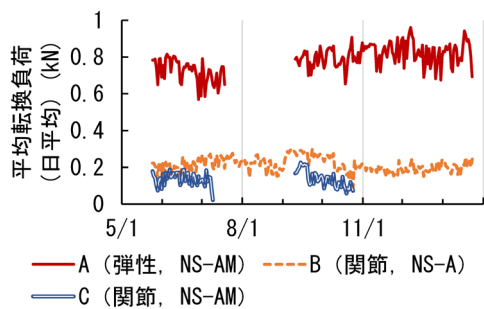


図1 電気転てつ機の平均転換負荷 (日平均値)

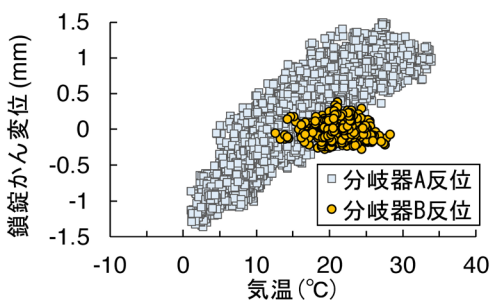


図2 電気転てつ機の鎖錠かん変位と気温の関係

推定が困難なため、センサにより鎖錠かん変位を測定する手段が特に有効と言える。

3.3 異常模擬試験

3.3.1 模擬負荷装置の製作

転換負荷の増加がモータ電流や転換時間等の状態監視項目に与える影響について、従来は稼働設備のデータ分析や、さび等でトングレールと床板の摩擦力を人為的に増加させて調査する手法がとられてきた。しかし、稼働設備を対象とする分析では、分析期間中に特定箇所の転換不能のデータを得ることが難しく、多くの箇所に対して長期間分析を行うことが必要となる。一方、人為的な手法は、転換不能を積極的に発生させる条件で行うため、データの取得は可能であるものの、発現までに数週間単位の時間を要し、複数回、同一の条件で現象を再現させることが困難であるという課題があった。

そこで、アクチュエータにより分岐器の転換負荷の増加を模擬し、電気転てつ機の動作かんに作用する転換負荷を増加させる模擬負荷装置の製作を行った。装置の構成と分岐器への実装例を図3に示す。反力を伝達するため、模擬負荷装置の筐体をまくらぎ端部に固定し、転てつ棒端部とエアシリンダをピンで結合して負荷を分岐器に作用させる。負荷の大きさはエアシリンダの空気圧にて設定する。分岐器の転換中も設定した圧力を一定に保つため、空気圧を一定に調整する精密レギュレータを用いた。

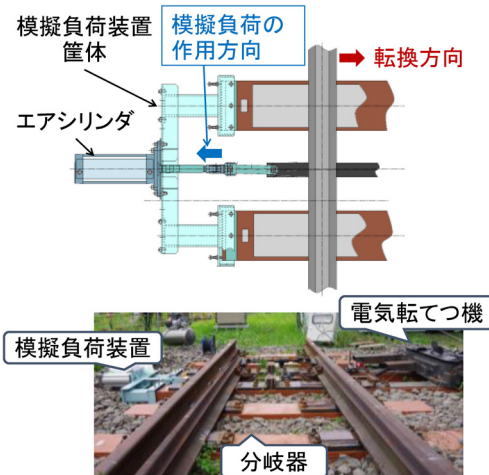


図3 模擬負荷装置

3.3.2 実験方法

鉄道総研所内の分岐器(60kレール12番弾性片開き)とNS-A形電気転てつ機、模擬負荷装置を用いて、分岐器の転換負荷と模擬負荷装置で発生した負荷を電気転てつ機に作用させた際の動作状態を測定した。図4に測定項目と評価項目を示す。

NS-A形電気転てつ機は、過負荷に対してモータの防

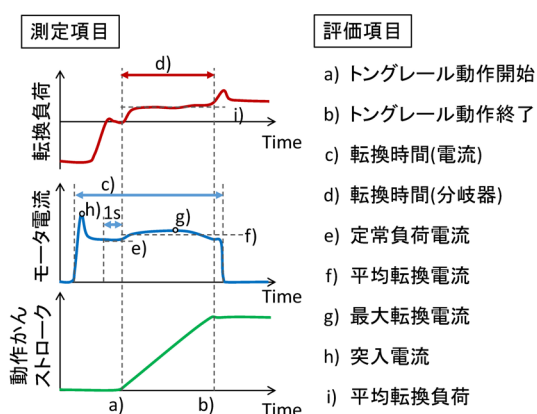


図4 測定項目と評価項目（模擬負荷装置試験）

護を行うフリクションクラッチがモータと換換機構の間に備えられている。本試験は、クラッチの伝達トルクを調整するねじについて、調整上限に設定した状態（以下、締切）と、その状態からねじを x 回転緩めた状態（以下、 x 回転ゆるめ）のそれぞれで実施した。モータ電圧については、定格の AC105V のほか、定格の -20% から +20% まで段階的に電圧を変更して実施した。

3.3.3 実験結果（モータ停止時の傾向）

クラッチ締切状態の最大換換電流、換換時間と平均換換負荷の関係を図5に示す。平均換換負荷の増加に従って、最大換換電流は増加傾向を示した。一方、換換時間は換換不能直前まで概ね5秒程度で推移し、換換負荷が5kNを超過して換換不能が発生する直前で換換時間が増加する傾向が示された。換換不能発生時には、クラッチのモータ側の回転軸と換換歯車側の回転軸が共に停止した。換換不能に至る直前の換換における最大換換電流とモータの動作開始時に観測される突入電流の関係を図6に示す。電源電圧に関わらず、最大換換電流が突入電流

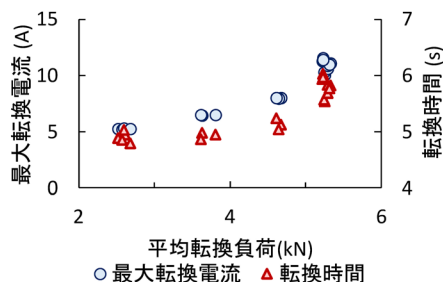


図5 平均換換負荷と換換電流、換換時間

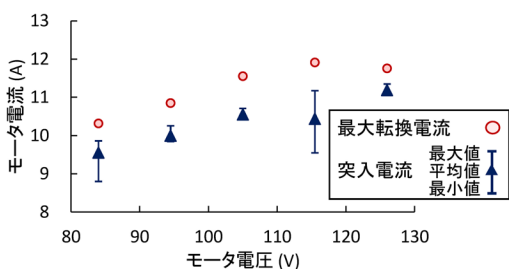


図6 最大換換電流（換換不能直前）と突入電流

を超過することが確認された。NS形電気転てつ機等で使用されている交流誘導電動機は、負荷トルクの増加に伴って回転速度が低下し、停動トルクまで増加するとモータ軸が停止する。また、停動時の電流は始動電流より大きくなる特性を有する¹⁾。負荷の増加に伴って換換時間が増加し、換換不能直前の電流が突入電流を超過する実験結果は、交流誘導電動機の一般的な特性と一致する。

3.3.4 実験結果（クラッチすべり時の傾向）

換換不能が発生する直前の最大換換電流、換換時間とクラッチの調整状態の関係を図7に示す。締切からクラッチ2回転ゆるめまでは、クラッチのすべりに先行してモータ軸が停止し、最大換換電流が突入電流の10Aを超過する傾向が認められた。3回転以上ゆるめた場合は、クラッチにすべりが生じることで換換不能が発生した。このとき、換換電流は突入電流を下回り、換換時間が通常時より2秒程度長い傾向が得られた。

図8に換換負荷と動作かんの位置から算出した換換歯車軸の最大トルクと最大換換電流との関係を示す。モータ軸停止時のトルク（停動トルク）は、クラッチの調整状態に関わらず締切状態とした際のトルクと同程度であった。一方、クラッチすべり時のトルクは調整ねじのゆるみ量にともなって低下し、最大換換電流と歯車軸最大トルクの間には線形な関係があることが示された。また、電圧低下に伴ってモータの停動トルクも低下する傾向が示された。

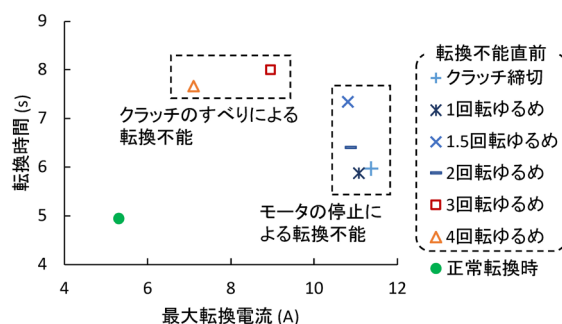


図7 最大換換電流と換換時間（クラッチ調整時）

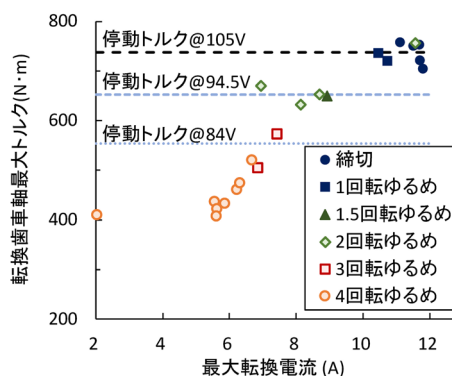


図8 換換歯車軸最大トルクと換換電流

3.4 状態推定手法の提案

3.4.1 転換負荷増加のための測定および評価項目

以上の実験結果より、転換負荷の増加による転換不能は、クラッチのすべりトルクを超過して発生する場合と、モータの停動トルクを超過して発生する場合が存在し、それぞれで転換電流と転換時間の変化傾向が異なることが確認された。

適切に調整されたフリクションクラッチや、無調整形のマグネットクラッチ等は、通常、停動トルクより小さなトルクでクラッチがすべるよう設計、調整されている。したがって、3.3.4項の実験結果より、転換負荷の増加による転換不能発生の予兆は、クラッチのすべりによる転換時間の増加に注目することで検出可能である。ただし、3.3.3項の実験結果のように、クラッチの調整不良や故障、モータ電圧の低下が発生した場合には、モータ軸の停止が先行するため、最大転換電流が突入電流を超過する特徴を示す場合もありうる。したがって、転換状態の推定は、従来から状態監視装置で測定、評価が行われている、転換電流と転換時間の両方に注目することが必要である。

3.4.2 原因の特定

電気転てつ機の負荷の増加は、分岐器の転換負荷増加以外にも、内部機構の負荷増加によっても生じる。現在の状態監視装置では、電流がしきい値を超過したことを条件として、一定時間経過した時点を転換開始、しきい値以下となった時点を転換終了としている。そのため、負荷増加の原因を特定することが困難である。しかし、負荷増加の原因に応じて必要な処置は異なるため、その原因を特定することが望まれる。

そこで、転換動作に伴って鎖錠かんが移動することに注目し、鎖錠かんセンサの出力からトングレールの移動開始、終了を検出する手法を提案する。図9に鎖錠かん変位情報を用いた転換不能原因判定のフローを示す。トングレール移動の開始、終了を鎖錠かん変位の情報を用いて検出することで、状態監視装置の測定項目や分解能等のハードウェア上の要件を変えずに、転換不能（電気

転てつ機の内部異常と分岐器の負荷増加）の原因特定が可能となる。

4. 軌道回路の状態推定手法

4.1 軌道回路の状態監視項目

軌道回路の状態監視で得られる基本的なデータは、送電側・受電側の電圧と電流である。これは電子化された軌道回路であっても同様である。また、商用周波数軌道回路の場合、局部電圧および局部電圧に対する電流の位相も基本的な監視対象である。しかし、軌道回路は連続的に稼働しているため、状態監視において軌道回路の瞬時波形を長期間に亘って蓄積することは困難である。そのため、定常時の波形は実効値等で代表し、軌道回路の動作・落下時以外のデータは間引くといった対策がなされる。

軌道回路の障害は不正落下と不正扛上に大別できる。遠隔監視においては、不正落下やその予兆を検知するため、列車非在線時の電圧・電流が所定のしきい値を下回った場合に警報を発する機能を持つことが一般的である。しかしながら、軌道回路の電圧・電流は正常時であっても降雨等により変動すること、変動の範囲が軌道回路毎に異なることから、検知能力と誤検知防止の両立が容易ではないという課題がある。

4.2 平常データの分析

商用周波数軌道回路を対象に、営業線駅構内の3軌道回路（A, B, C）について遠隔監視を実施し、平常データの分析を行った。図10に列車非在線時の軌道リレー電圧の推移（各日の最大値・最小値）を示す。また、図11に軌道回路Cの夏季1か月における残留電圧（在線時の軌道リレー電圧）の瞬時最大値（点）と降水量（実線）の関係を示す。なお、残留電圧は最大値で正規化している。

図10が示すように、列車非在線時の軌道リレー電圧の定常値については、季節や天候等の影響が小さかった。この傾向は軌道リレー電圧以外の定常値も同様であつ

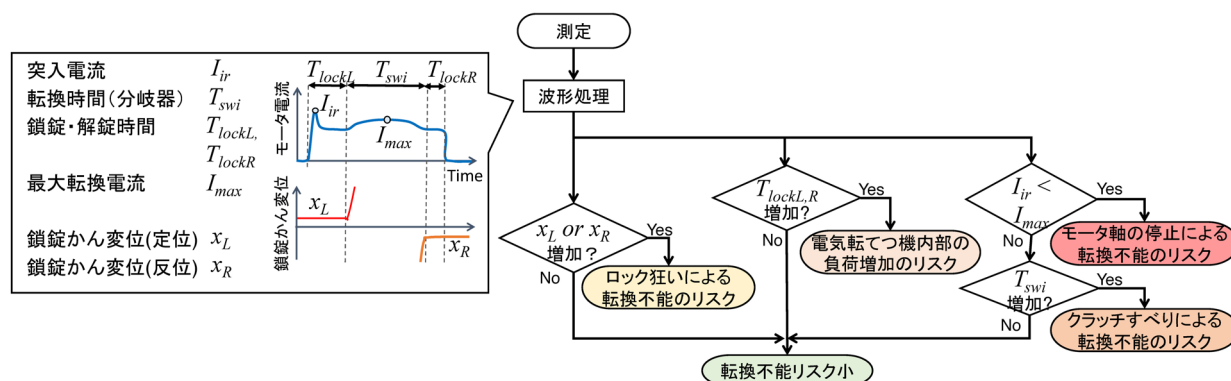


図9 転換不能原因特定フロー

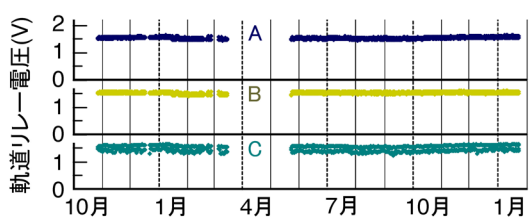


図10 非在線時の軌道リレー電圧の推移

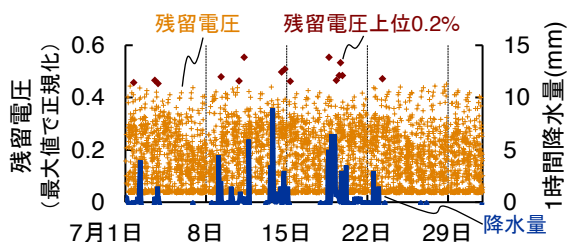


図11 残留電圧の瞬時最大値と降水量の関係

た。ただし、駅中間の数 km 程度の軌道回路では、天候に伴う漏れコンダクタンスの変動も考慮する必要がある。

一方、図11のように、残留電圧の瞬時最大値は、降雨時に高い値を記録することが確認された。これは降雨によりレール表面にさびが生じ、車輪-レール間の接触抵抗の増加により残留電圧が増加したためと言える。しかし、図11が示すように、降雨時に限らず、乾燥時でも高い残留電圧が生じる場合があり、残留電圧の大きさのしきい値比較による短絡不良の警報は容易ではない。

軌道回路の平常時データは、数か月から1年程度の期間での緩やかな変動から、将来の状態を推定することが困難であることを示唆している。このため、障害の予兆検知を行うためには、軌道回路の現在の状態を正確に捉えることが重要であると考えられる。

4.3 波形の歪みへの着目

4.3.1 レール表面のさびと波形の歪み

レール表面のさびは半導体の性質を持ち、さびにより残留電圧波形が歪むことが知られている²⁾。また、筆者らは模型実験の結果から、さびの厚さ等により歪み方が異なると推測している³⁾。これらの研究より残留電圧波形の歪みから短絡状態の良否を評価可能と考えている。

しかし、残留電圧波形に基づく短絡状態の良否判定には、実際に列車が軌道回路を短絡しないと行えないという本質的な課題がある。したがって、短絡不良による不正扛上の防止のためには、列車が短絡した軌道回路の波形から、時々刻々と変化するその他の軌道回路の短絡不良のリスクを予測できることが求められる。

残留電圧の大きさによる判定に対して、波形の歪みに着目する方法は、車輪-レール間の電氣的接触という、より根源的な現象に基づくため、他の軌道回路のリスク評価に応用するための一般化が容易であり、不正扛上の

防止を図る上で有用であると考えられる。

4.3.2 インピーダンスボンドの磁気飽和の模擬

軌道回路信号の波形を歪ませる要因として、さびの他にトランスの磁気飽和が挙げられる。電化区間の軌道回路では、トランスの一種であるインピーダンスボンドが用いられる。軌道回路に不平衡がある場合、帰線電流の不平衡成分がインピーダンスボンドの鉄心を磁化させる。不平衡成分が増加し磁気飽和に至ると、軌道リレー電圧が低下し、不正落下に至る場合がある。

インピーダンスボンドの磁気飽和の影響を定量的に把握することで、以下の2点の効果が得られる可能性がある。一つは磁気飽和により軌道リレー電圧の低下が生じた際に、リレー故障等の他の要因に対する警告の誤報が減らせる効果である。もう一つは、磁気飽和の程度や発生しやすさの変化から、レールボンド脱落等の障害の推定・早期発見が可能になるという効果である。後者については十分なデータがなく、現状では可能性の提示に留まるが、磁気飽和の影響の定量化は検討に値するものと考えられる。

これまで、磁気飽和が軌道回路信号に与える影響について、波形の歪みに着目した十分な検討はなされていない。そこで汎用の小容量トランスを用いてインピーダンスボンドの磁気飽和時の現象理解を図ることとした。

図12に、直流電流を変化させた際の波形の歪み方を、横軸を入力電流、縦軸を出力電圧とした電流-電圧曲線で示す。ここで入力電流はインピーダンスボンドのレール側、出力電圧は軌道リレー側の電圧に相当し、直流電流成分は帰線電流の不平衡成分に相当する。波形に歪みがない場合、電流-電圧曲線は直線または楕円を描く。図12は、直流成分の絶対値が増加すると、磁気飽和によって出力電圧の振幅が小さくなり、歪みが増加することを示している。この実験は、実際のインピーダンスボンドの特性を定量的に反映したものではないが、上記の定性的な傾向は共通すると考えられる。

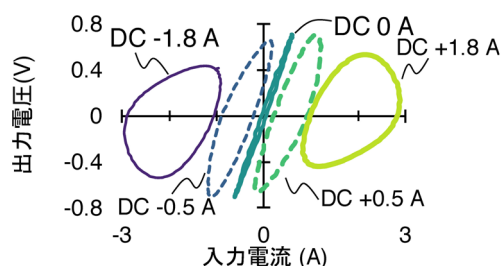


図12 小容量トランスを用いた磁気飽和の観察

4.4 高調波データと回路モデルを用いた状態推定手法

4.4.1 軌道回路の電気回路モデル

軌道回路の基本的な状態監視項目は送・受電側の電圧・電流であるが、それらの正常値や変動範囲は軌道回路毎

異なる。したがって、電圧・電流の情報を、周辺の軌道回路で共通の要素と当該軌道回路固有の要素に分離できることが有用と言える。そこで、電圧・電流の情報を電気回路モデルのパラメータに変換し、そのパラメータの組を軌道回路の状態と対応付ける手法を提案する。

軌道回路の電気回路モデルとしては、軌道回路を線形回路と見なし、四端子回路網で表現する手法が以前から用いられている⁴⁾。提案する状態推定手法では、この四端子回路モデルを踏襲する。電圧・電流の情報を四端子回路パラメータに変換するため、提案手法では電気回路シミュレーションを用いる。パラメータを変化させながらシミュレーション結果と実測データの比較を繰り返すことでパラメータを同定する。

4.4.2 高調波データの利用

一般的な四端子回路モデルは、線形回路ゆえに本研究で着目した波形の歪みを直接扱うことができない。そこで、基本構成が同一でパラメータが異なる四端子回路を周波数毎に複数用意する方法を採用する。軌道回路信号は、理論的には連続的な周波数スペクトルを持ちうるが、経験的には、基本波成分と離散的な高調波成分からなると見なせる。特に商用周波数軌道回路であれば、基本波成分に加え、3次、5次高調波成分を扱えれば、実際の軌道回路信号の波形の歪みを十分に再現できる。

現状の軌道回路監視では波形の歪み、すなわち高調波の情報はデータ化されていない。しかし、近年の状態監視装置では、軌道回路信号周波数より高い周波数でサンプリングを行い、デジタル信号処理により実効値等を算出する方式が採用されており、センシング段階では高調波の情報が得られるという仮定は十分に实际的である。

4.4.3 予想される効果

図13に提案する軌道回路状態推定手法の概要を示す。四端子回路パラメータを用いることで、降雨の影響を受ける漏れコンダクタンスと、その他の設備固有の要素を分離できる。これにより、設備固有の値が変動した際に軌道回路に何らかの異状が発生した可能性があるかと判断できる。また、漏れコンダクタンスは近接する軌道回路間で相関が高くなるのが期待できるため、近接する軌道回路間で変動傾向が異なる場合、何らかの異状が発生した可能性があるかと判断できる。そして、高調波成分のパラメータ変化によりレールのさびや磁気飽和の影響を評価することが可能となる。これらは直接的に異状の検知能力を高めるという点だけでなく、誤検知防止により間接的に異状検知を容易にするという点で有用と考える。

5. まとめ

電気転てつ機と軌道回路を対象に、設備状態を推定する手法の研究を行った。電気転てつ機については、クラッ

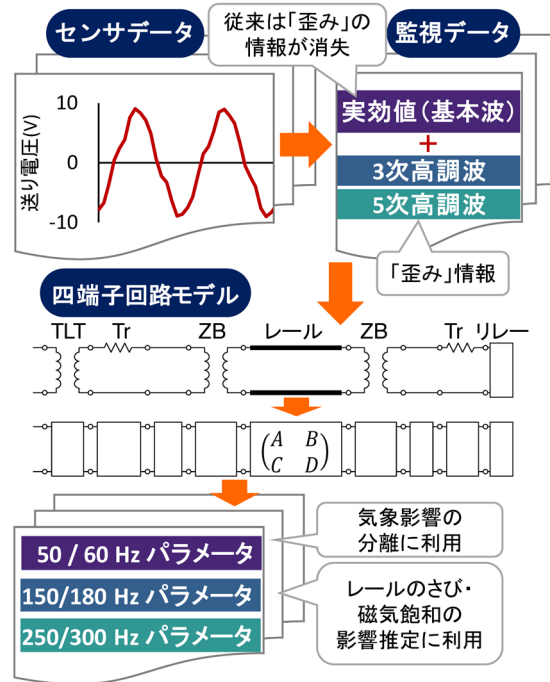


図13 提案軌道回路状態推定手法の概要

チすべりとモータ停止による転換不能を模擬し、前者では転換時間の2秒以上の増加、後者では最大転換電流が突入電流を超過することを確認した。そして遠隔監視データにより、これらの項目を評価することで転換不能の予兆を検出する手法を提案した。軌道回路については、軌道回路信号の波形の歪みに着目し、遠隔監視データから四端子回路モデルのパラメータ同定を行うことで、状態を推定する手法を提案した。

今後は、更なる営業線データに基づく手法の有効性の確認や、遠隔監視システムへの応用について検討していきたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、四国旅客鉄道株式会社の関係各位の協力を戴いた。ここに記し感謝の意を表す。

文献

- 1) 坪島茂彦：図解 誘導電動機—基礎から制御まで—，東京電機大学出版局，2001
- 2) 日本鉄道電気技術協会：鉄道技術者のための信号概論 信号シリーズ9 軌道回路〔改訂二版〕，2008
- 3) 遠山喬ほか：車輪・レール接触状態に基づく短絡抵抗推定手法，鉄道総研報告，Vol.28, No.4, pp.5-10, 2014
- 4) 高重哲夫：軌道回路(9)，鉄道と電気技術，Vol.10, No.12, pp.54-57, 1999