

鉄道電力設備のメンテナンスと劣化予測

公益財団法人鉄道総合技術研究所 研究開発推進部 主管研究員
網干 光雄



1. はじめに

鉄道電力設備は、電気車などに安全で安定して電力を供給することが求められる。これまでも検査・診断技術や部材の長寿命化、省メンテナンス設備、異常検知、保護装置などのさまざまな技術や対策が導入されてきている。本講演では、電力設備のメンテナンスの課題と最近の研究成果を紹介するとともに、鉄道総研で進めているシミュレーション技術と画像計測技術を組み合わせた電車線路設備の劣化予測技術を紹介する。さらに、今後の電力設備のメンテナンスの方向性について述べる。

2. 鉄道電力設備のメンテナンス

(1) 電力設備による輸送障害等

鉄道技術推進センターの安全データベースを基に、全国の鉄軌道事業者における2006～2015年度の電力設備による運転事故や輸送障害の約1900件を分類した。図1に示すように、設備別では、電車線路設備によるものが約8割と大半を占めている。原因別では、飛来物や樹木、動物、気象によるものなどがあり、設備の劣化や不良によるものは全体の2割程度である。

劣化や不良によるものに注目すると、図2に示すように、設備別では電車線路設備が約1/2とやはり多い。

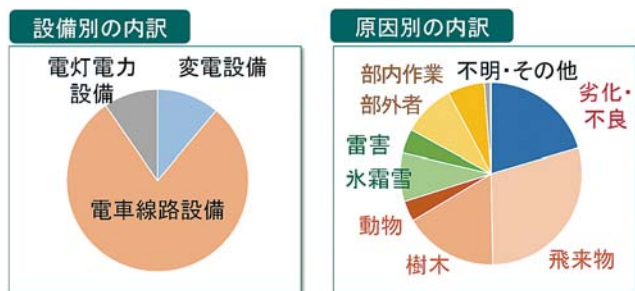


図1 電力設備による輸送障害等

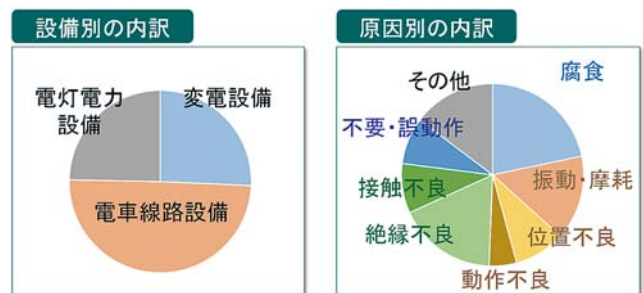


図2 劣化・不良による輸送障害等

また原因別では、腐食によるものが約2割を占めるほか、振動疲労や摩耗、電線の離隔不足などの位置不良、機器の動作不良などの機械的なものや、絶縁不良、接触不良の電氣的なものなどさまざまである。不要動作や誤動作は、変電所のセンサーや保護装置などであるが、変電設備に限ればこれが4割近くを占めている。

(2) 5つの段階と4つのメンテナンスフェーズ

図3に示すように、電力設備の場合、輸送障害等として顕在化するまでには5つの段階がある。まず劣化の原因となる事象があり、これにより部品の性能が低下する。これを放置するといずれ限度を超え、部品故障に至る。もし予備設備がなければ、システム全体としての機能不全に陥る。変電所では遮断器を開放するという保護機能があるが、もしその機能が不十分であれば機器の焼損などの形で顕在化する。

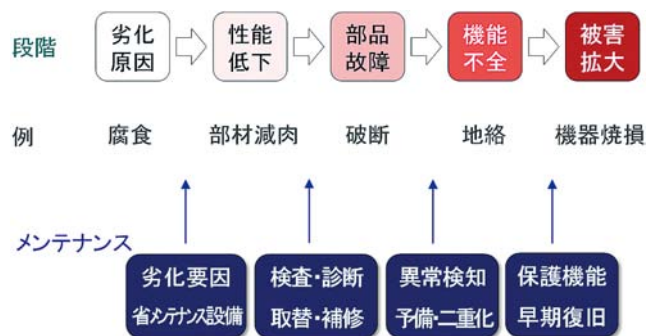


図3 5つの段階と4つのメンテナンスフェーズ

これらの5つの段階に対して、メンテナンスには4つのフェーズがある。まず第一に、劣化原因となる現象を解明し、その要因を軽減することで設備の長寿命化を図ること、また装置や部品そのものを減らすなどして省メンテナンス設備に改良することである。第二は、性能低下の状態を検査・診断して、故障や不良に至る前に取替や補修を行うことである。第三に、部品の故障や異常を検知する機能を備えることや、予備系を設けたり設備の二重化を図ることである。第四は、保護装置が正常に機能するように、保護リレーの整定値見直しやセンサー類の点検を行うことなどである。また事故が発生した後に、速やかに事故点を探索して早期復旧を図るのもこのフェーズに入る。

実際に、現場サイドにおけるメンテナンスの課題の最近の動向として、日本鉄道電気技術協会の開催するフォーラムにおいて発表された件名(2014~2016年)¹⁾をメンテナンスの4つのフェーズで分類すると、劣化要因・省メンテナンス設備に関するものと、検査診断・取替補修に関するものを合わせて約8割を占めている。設備別では、図2の劣化・不良による輸送障害等の割合とほぼ同じで、電車線路に関するものが約1/2と最も多い。電車線路設備は予備系が無く、装置や部品の故障がそのまま全体の機能不全に至ることが多いので、現場における課題もメンテナンスフェーズの前半に集中していると思われる。

3. メンテナンスの課題と最近の研究成果

ここでは、上記の4つのメンテナンスフェーズごとに具体的な課題をいくつか取り上げて、鉄道総研の最近の研究成果を紹介する。

(1) 劣化要因の解明(ポリマーがいし)

ポリマーがいしの心材には、強度部材としてFRP(繊維強化プラスチック)が用いられているが、このFRP製ロッドが破断するという事例が発生している。鉄道総研でその劣化要因を調査した結果、エポキシ樹脂とガラス繊維を組み合わせただけの状態では、応力が作用した状態で酸や水分が介在すると脆性破壊を生じやすいことを明らかにした²⁾。対策としては、金具との接合部分や穴明け部分をシール剤などで水分が浸透しない構造にする必要がある。

(2) 検査・診断(変圧器)

変圧器は、経年や温度上昇により絶縁性能が低下するが、密閉構造のため外部から検査することは困難である。そこで、絶縁紙から油中に分解されたフルフラ

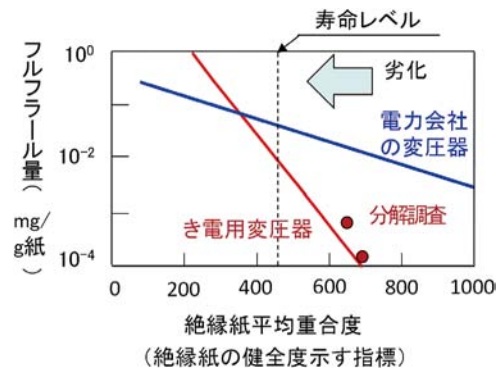


図4 変圧器の劣化診断

ルという有機物の量によって変圧器の絶縁劣化の度合いを調べる方法がある。今回新たに鉄道き電用変圧器を分解して調べたところ、図4に示すように、電力会社の変圧器とは異なり、温度上昇が比較的低い変圧器に適用する判定指標に近いことがわかった³⁾。

(3) 異常検知(ケーブル過熱)

変電所などの配電盤における障害の原因の一つに、電力ケーブルの異常過熱が挙げられる。ケーブルの被覆には曲げやすくするために可塑剤が混合されており、ケーブルが過熱されると揮発性成分が放出される。そこで鉄道総研では、匂いを検出する半導体センサーを用いて、ケーブルの異常過熱を検知する装置を開発している⁴⁾。

(4) 早期復旧(故障点標定)

地絡や短絡故障時に速やかに送電を再開するためには、要員を直ちに故障箇所に派遣し故障原因を解消する必要がある。鉄道総研の提案するサージ検出型故障点標定は、故障時に発生するサージ電圧を両端で検出して、その時間差から故障位置を標定するものである。これまでの標定精度は、例えば20kmのき電区間では最大1km程度の誤差があったが、この方法では50m程度と大幅に精度が向上する。

4. 電車線路設備の状態監視と劣化予測

次に、メンテナンスのウェイトが大きい電車線路設備の特に前半のフェーズに着目して、状態監視技術の動向や鉄道総研が研究を進めている劣化予測技術について今後の展開を含めて述べる。

4.1 電車線路設備のメンテナンスの動向

(1) 劣化・不良による輸送障害等

2章で示した劣化や不良による輸送障害等の統計を電車線路設備に限定すると、図5のようになる。設備

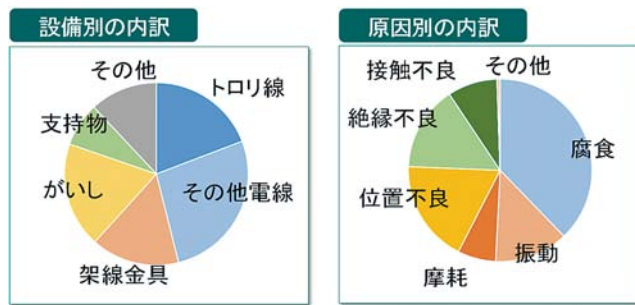


図5 電車線路設備の劣化・不良による障害

別では、トロッコ線や電線などの電線が全体の4割近くを占める。このほか、コネクタなどの架線金具や、がいし、支持物が挙げられる。原因別では、腐食が最も多く4割近くを占める。また振動や摩耗などの機械的要因や、電線の離隔不足などの位置不良によるものが約4割を占めているほか、絶縁不良や接触不良などの電氣的要因が2割強を占めている。

(2) 状態監視技術の動向

このような状況において、電車線路設備においても、劣化度合いを常時または高頻度で検査する状態監視技術が開発されている。

その一つとして、トロッコ線の摩耗や偏位を定期的に計測する検査車両がJRをはじめ大手民鉄のほとんどの事業者で導入されており⁵⁾、最近では営業車で高頻度に計測している例もある⁶⁾。検査結果に基づいて計画的なトロッコ線張替えや補修が行われており、統計からも摩耗によるトロッコ線断線事故はわずかであることから、検査車両による状態基準保全が有効に機能していると思われる。

また、電線接続箇所に温度センサーを設置して発熱を計測することにより、接触不良の兆候を捉える装置が開発されている⁷⁾。

(3) 省メンテナンス設備の動向

設備点数を削減するため、省メンテナンス設備へのリニューアルも進められている。従来の電線3本の架線を2本に減らした新幹線用高速架線⁸⁾は、列車本数の多い大容量の路線においてもリニューアルに合わせて適用が始まっている。

また、都市間を結ぶ在来線はかつては旅客輸送の大動脈として電化されたが、新幹線開業などに伴いその役割も変化してきた。そこで、負荷の実態にあわせて電圧補償対策と組み合わせるなどして、設備点数を減らす検討がなされている⁹⁾。今後、更新時期にあわせて省メンテナンス設備へのリニューアルが進むものと思われる。

4.2 シミュレーションと画像計測による劣化予測

このような状況にあって、今後の電車線路設備のメンテナンスについて考えると、電車線路には予備系がないため部品故障に至る前の前半のフェーズが今後も中心になると思われる。現状ではまだ目視検査が多く、状態監視技術の適用は今後も拡大すると思われる。しかしセンサーによる状態監視を考えると、電車線路は長大な構造物で設備点数が多いこと、劣化要因も様々であり、劣化箇所も限定しにくいことなどから、多数のセンサーを設置することは、センサー自体の故障やメンテナンスを考えると実際には難しいことが予想される。そこで鉄道総研では、シミュレーション技術と画像計測技術を組み合わせた劣化予測技術を用いて、部材の長寿命化や検査の効率化、センサーを取り付けない非接触の状態監視などを目指して、現在、研究を進めている。以下に、その内容を紹介する。

(1) 画像による状態計測

画像による電車線路の状態計測は、これまでもすでに紹介している。レーザー測域センサーで各電線の大きな位置を把握した上で、ラインカメラのステレオ画像から三角測量の原理で電線位置を計測するハイブリッド方式である¹⁰⁾。図6に計測例を示すが、電気検測車では計測できないちょう架線やハンガなどの位置も計測することが可能である。

(2) 運動シミュレーションによる動的挙動予測

劣化予測のツールの一つとして、架線・パンタグラフの運動シミュレーションの活用をすでに提案している¹¹⁾。電車線路では、パンタグラフ通過時の振動や変位などの機械的要因が劣化原因の一つになる。そこで、図7に示すように、画像で計測した電車線の架設状態を入力データとして、速度やパンタグラフなどの走行条件を与えて、パンタグラフが走行したときの動的挙動を予測するものである。

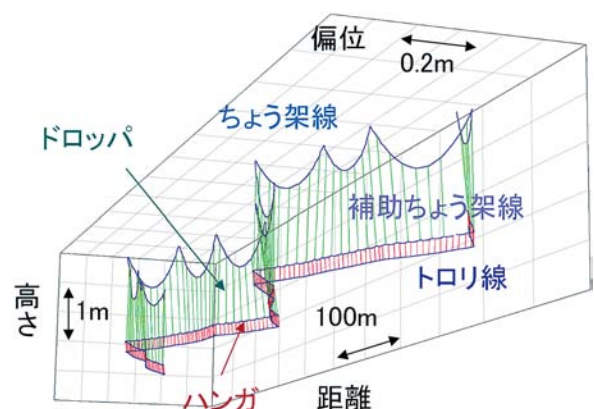


図6 電車線位置の画像計測例

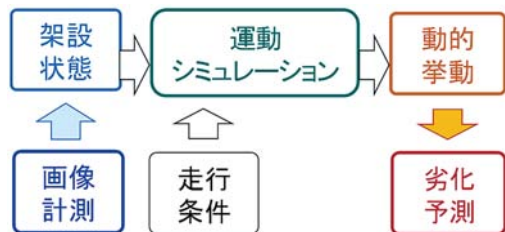


図7 パンタグラフ走行時の動的挙動予測

(3) トロリ線の摩耗予測

この運動シミュレーションと通電接点の摩耗現象に関する最新の知見を組み合わせることで、トロリ線の摩耗進行の速い箇所を予測できると考えている。

鉄道総研における最近の基礎研究により、トロリ線とパンタグラフ間の接触力の大きさによって、3つの摩耗形態があることをはじめて明らかにした¹²⁾。図8に示すように、接触力が10N弱の領域でトロリ線が溶融して摩耗率が最大となる。この摩耗現象は接点間に形成される溶融ブリッジの特性で定式化できるので、上記の運動シミュレーションの結果に基づいて、接触力と集電電流からその場所のトロリ線の摩耗を予測することが可能になると考えている。これにより断線事故の危険性を減らすだけでなく、局部摩耗が解消できれば、トロリ線の長寿命化につながり、メンテナンスコストを下げるができる。

(4) 振動疲労による劣化予測

さらに、運動シミュレーションと架線金具の振動解析の組み合わせにより、振動疲労による劣化予測が可能である。コネクタ金具は、構造上、振動疲労による劣化が弱点となっている。図9に示すように、運動シミュレーションから得られる電線の振動変位を入力して、コネクタ金具のリード線に発生する応力を予測す

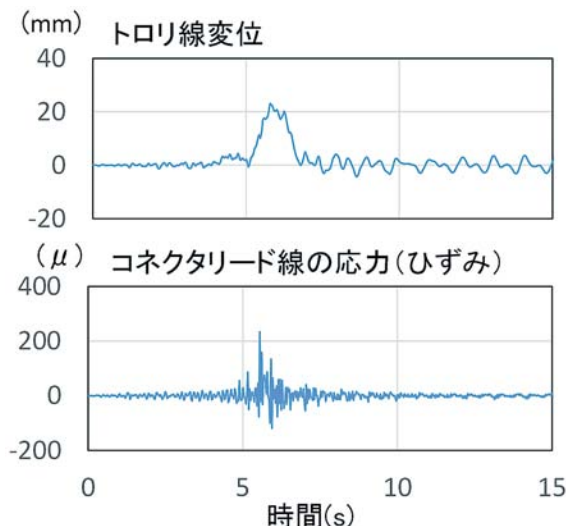


図9 振動疲労による劣化予測

ることができ、この応力を積算することで振動疲労による寿命予測が可能である¹³⁾。

(5) 位置不良の予測

画像計測では、図10に示すように、電線が入り組んでいても、またき電線や配電線などのその他の電線の位置も計測できる。さらに、測域センサーにより支持物や近接建造物などの位置も把握することができる。これらのデータを用いることで、例えば気温の変化や、パンタグラフ通過時のシミュレーション結果と組み合わせることで、電線間の離隔距離を予測して短絡事故や循環電流による損傷を未然に防いだり、トンネル内などの狭隘な箇所での離隔距離の確保、建築限界のチェックなどが可能である。

(6) 画像による状態記録

画像計測のもう一つのメリットは、図11に示すように、装置や部材が画像として記録できることである。画像は精度に限界はあるが、広範囲にわたって視覚的

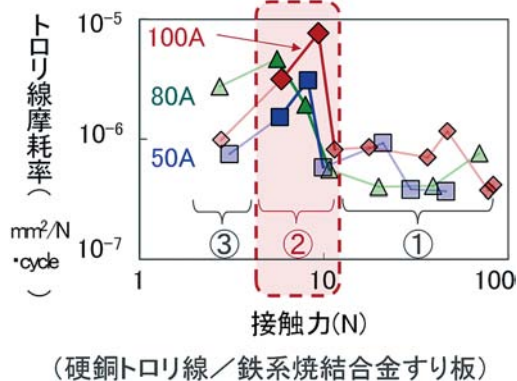


図8 通電時の接触力とトロリ摩耗率との関係

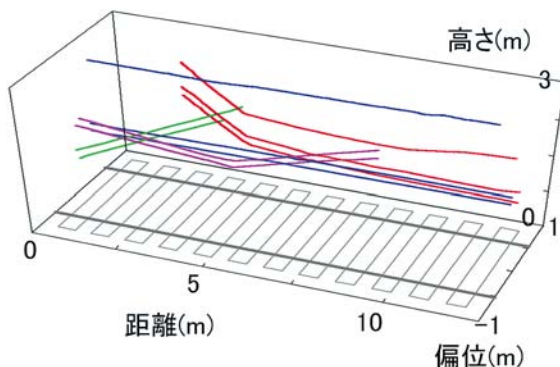


図10 画像計測と電線位置不良の予測

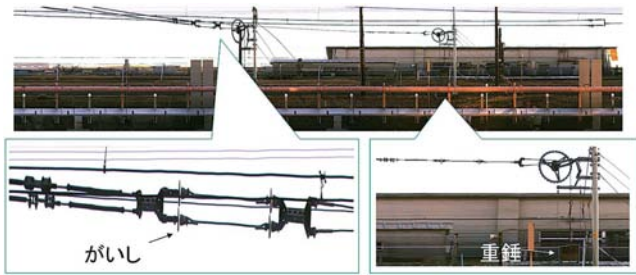


図 11 画像による状態記録例

に確認できることが特長である。画像に処理を施すことで、劣化箇所が限定しにくい電線の腐食や素線切れなどの振動疲労の兆候が捉えられる可能性があり、現在、自動的に検出する方法などを研究している。画像計測は、頻度を高めることでいわば状態監視技術の一つと考えられ、電車線路設備以外も含めた鉄道施設の共通の状態監視技術として活用できると考えている。

(7) 腐食による劣化予測

可動ブラケットの鋼管パイプ減肉量と経年との関係を調べた結果から、塩害区間の方が一般区間に比べて平均的には腐食が進行していることが報告されているが、同一環境区分内のばらつきが大きい¹⁴⁾。そこで、設置場所特有の腐食環境が推定できれば、寿命を予測し検査や取替時期をより適切に設定可能である。このためには、撤去品調査から統計的に求めるほか、鋼材表面の亜鉛めっきの劣化度、つまり表面の亜鉛や合金層の露出度合いを画像で高頻度に計測できれば、その箇所の腐食速度を推定できる可能性がある。

(8) 電車線路設備の劣化予測

以上述べてきた電車線路の劣化予測技術について、図12にまとめる。これらの対象となる原因をあわせると、劣化・不良による輸送障害等の件数の約3/4に

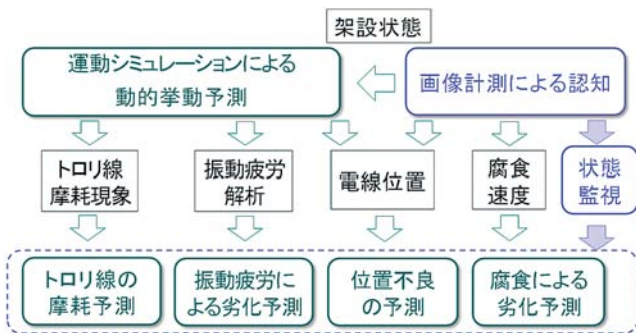


図 12 電車線路の劣化予測技術

相当する。劣化箇所の予測から検査箇所を重点化したり、劣化速度の予測から検査や取替時期をより適切に計画することが可能になる。また、劣化予測に基づいて劣化要因を軽減することで部材の長寿命化が可能となる。一方、画像による状態監視は、これまで目視検査に頼っていた部分の省力化や記録保存などの効率化が図れる可能性がある。これらにより、障害発生リスクを下げると同時に、メンテナンスコストの低減も可能になると考えている。

5. 電力設備メンテナンスの今後の方向性

最後に、これまで述べたことを踏まえて、電力設備の今後のメンテナンスの方向性について触れる。

(1) 電車線路設備のメンテナンス

図13に、電車線路のメンテナンスの方向性を示す。まず、トロリ線摩耗に関しては、検査車両による状態基準保全が今後とも重要な役割を担うことになる。また、更新時期に合わせた省メンテナンス設備へのリニューアルは今後も進められるものと思われる。絶縁不良や接触不良については、劣化箇所が比較的限定されやすいことから、センサーを用いた状態監視技術の適用が拡大するものと思われる。しかし、これ以外の劣化要因については、現時点では主に目視検査に頼っているのが現状で、何らかの手法が求められる。

振動、摩耗、位置不良などの機械的な劣化要因に対しては、ここで紹介したシミュレーションと画像計測技術を組み合わせた劣化予測技術が有効と考えている。腐食については、撤去品調査や腐食環境の適切な区分により、劣化予測の精度を高める必要がある。画像による計測は、状態記録や監視技術として幅広く活用できるものと考えている。

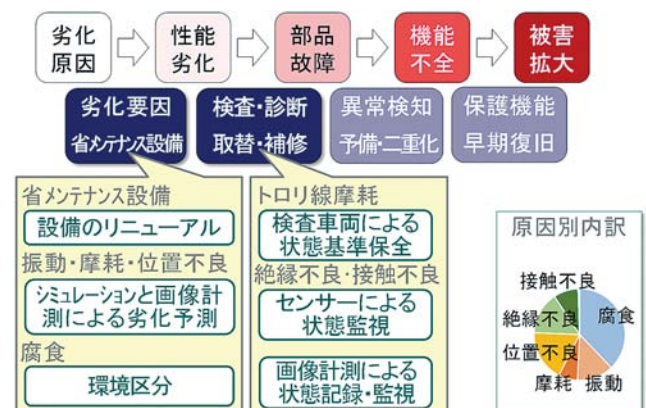


図 13 電車線路設備のメンテナンスの方向性

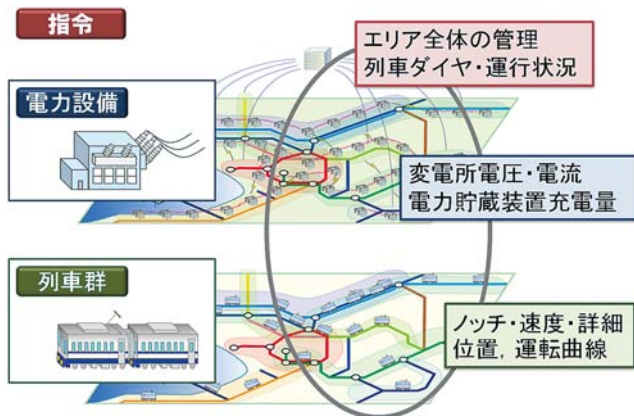


図14 エネルギーネットワーク

(2) 変電設備のメンテナンス

動力機器の動作不良に対しては、劣化を検知する状態監視技術が今後重要になると思われる。変電所で常時監視している電圧や電流・温度などのデータについては、機器の劣化予測への活用が今後の課題である。また、保護装置の不要動作や誤動作が輸送障害等の4割近くを占めており、保護リレーの整定値見直しなどを進める必要がある。

(3) エネルギーネットワークの活用

エネルギーネットワークは、図14に示すように、変電所や車両の情報のネットワークを構築し、リアルタイムに制御することで、全体として省エネルギーを目指すものである¹⁵⁾。このエネルギーネットワークを状態監視や保護装置として活用すれば、例えば、力行する電車がき電区間内にいないにも関わらず大電流が流れている場合は、高抵抗地絡や絶縁不良などの異常と判断できる。また早期復旧という観点からは、保護装置が動作した後に故障発生時のデータを自動的に付き合わせることで、故障箇所の詳細位置や状況を早期に把握することができ、早期復旧と迅速な原因究明や対策の実施に役立つものと思われる。

6. おわりに

本講演では、安全で安定した電力供給を行うためのという観点から紹介したが、電力設備にはこの他にも、省エネルギー、低コスト、高速化といったメンテナンスと深く関わるキーワードもあり、鉄道総研ではこれらの研究もあわせて進めている。今後ともご支援を賜りますようお願い申し上げます。

参考文献

- 1) 鉄道電気テクニカルフォーラム発表会要旨集，日本鉄道電気技術協会，2014，2015，2016
- 2) 菅原 淳，他：電車線金具におけるFRP脆性破壊現象の実験的再現と防止策，鉄道総研報告，Vol.29，No.12，pp.23-28，2015
- 3) 変圧器の寿命判定法，鉄道総研技術フォーラム，2016
- 4) 赤木雅陽，他：変電所機器劣化監視診断技術の開発，鉄道総研報告，Vol.28，No.10，pp.11-16，2014
- 5) 鉄道における環境に配慮した電車線のメンテナンスに関する調査報告，電気学会技術報告，第1235号，2011
- 6) 高橋敦宏：営業車両搭載用電力設備モニタリング装置の開発，日本機械学会第22回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，No.1203，2015
- 7) 山本浩志，松本晃，下原光幸：高頻度データによる設備状態判定に関する検討，平成28年電気学会全国大会第5分冊，pp.265-266，2016
- 8) 鹿間宏一，他：大電流容量高速シンプル架線の開発，平成27年電気学会産業応用部門大会，No.5-18，pp.V 191-196，2015
- 9) 日本鉄道電気技術協会：都市間電車線路設備技術検討報告書，2014
- 10) 根津一嘉，他：ステレオ画像計測とレーザー測距を併用した架線の非接触位置測定手法，鉄道総研報告，Vol.28，No.10，pp.29-34，2014
- 11) 網干光雄：動特性計算による架空電車線凹凸の評価法，電気学会論文集D編，Vol.126，No.7，pp.983-988，2006
- 12) 山下主税：電気鉄道における集電材料の通電摩耗機構に関する研究，東北大学博士学位論文，2015
- 13) 山下主税，他：有限要素法を用いた電車線コネクタの疲労寿命推定手法，鉄道総研報告，Vol.28，No.10，pp.23-28，2014
- 14) 白木理倫：亜鉛めっき鋼管製電車線路支持物の腐食劣化状態評価，鉄道総研報告，Vol.29，No.12，pp.17-22，2015
- 15) 兎束哲夫：電力制御のリアルタイム化によるエネルギーネットワーク，第28回鉄道総研講演会要旨集，pp.31-37，2015年