

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# 変電機器の劣化状況を診断する

変圧器に代表される変電機器は、製造してから30年間程度運用されることが一般的です。一方、ひとたび故障が起きると停電による輸送障害を伴う場合があります。このため、変電機器が寿命を迎えるまで安全に運用するためには、その劣化状況を適切に評価し診断する必要があります。ここでは、現在の変電機器保全手法の概要を紹介するとともに、近年検討が進められている評価手法の例として、交流き電用避雷器と、電気鉄道用変圧器の絶縁紙の劣化評価手法について紹介します。



**赤木 雅陽**  
Masataka Akagi  
電力技術研究部  
き電研究室  
主任研究員  
[専門分野] 変電設備の  
保守管理

## はじめに

電気鉄道用変圧器に代表される変電機器は、電車を安定して運行するためには欠かせない設備です。しかし、変電機器は比較的高額の機器であるほか、設置してから30年間程度の運用が一般的です。加えて、変電機器の製造には通常数ヶ月の歳月を要することを踏まえ、変電機器は定期的に検査を施しその健全度を把握するとともに、効率的な取り替え計画を策定することが重要となります。

ここでは、鉄道における変電機器の保全手法と検査周期の概要を紹介するとともに、近年検討が進められている劣化評価手法の例として、高調波漏れ電流成分の増加分検知に基づく交流き

電用避雷器の劣化評価手法と、電気鉄道用変圧器の運用環境に適した変圧器用絶縁紙の劣化評価手法について紹介します。

## 変電機器の保全手法と検査周期

通常、各鉄道事業者は社内規定により表1のように変電機器の保全方法と周期を定めています<sup>1)</sup>。たとえば変圧器の保全にあたっては、時間基準保全(TBM: Time Based Maintenance)に基づき数週間ごとの目視点検や簡易点検、年～数年ごとに定期点検やオーバーホールを行うのが一般的です(表1)。定期点検時の代表的な検査項目としては絶縁抵抗、絶縁油の耐電圧特性などがあげられます。

表1 一般的な変電機器(本例は変圧器)の保全周期<sup>1)</sup>

項目	点検項目	点検周期
目視点検	異音、匂い、過熱の有無など	1～数ヶ月ごと
定期点検	絶縁抵抗、絶縁油検査	1～5年ごと
精密点検 (オーバーホール)	油中ガス分析、絶縁紙の劣化度、パッキン交換、機器表面の塗装補修	5～10年ごと
取り替え		30年 (製造メーカー推奨値)

表2 工業製品における故障の特徴

パターン名	故障原因	故障の時期
故障率減少型	製造時点での欠陥	比較的早期に発生し後日顕在化することが少ない
故障率一定型	金属疲労など	製造からの経過時間に関わらずある一定の確率で発生
故障率増加型	摩耗や腐食など	製造してからある程度年数が経ってから発生

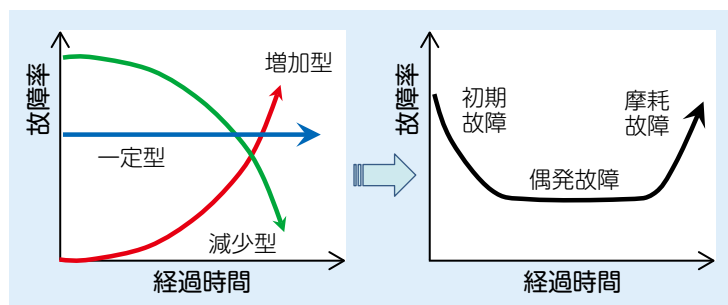


図1 設備の故障率とバスタブ曲線

また、社内規定自体は鉄道営業法、ならびに電気事業法などの規程に基づく省令、告示、実施基準などに適合するように定める必要があります。では、これらの点検周期はどのような根拠に基づき規定されているのでしょうか。

一般に変電機器は、ある設計図に基づき同種のものが複数台製造される工業製品です。工業製品における故障の特徴は表2のようにまとめられます。また、それらの故障率特性を合算すると、あたかもバスタブのような形をしていることから、一般にバスタブ曲線と呼ばれています(図1)。

たとえば機器表面の塗装は劣化速度(故障率の増加傾向)が比較的ゆるやかですので、数年ごとの点検と補修でも十分処置可能です。一方、異音や絶縁抵抗低下を伴う劣化は、速やかに補修を施さないと重篤な輸送障害を来すおそれがありますので、比較的短めの点検周期に設定する必要があります。

また、近年のセンサー技術やビッグデータ処理技術の普及にともない、設備の状態をセンサーなどで定期的に監視して故障予兆を早期に把握すると

もに、設備の劣化状況に合わせて適切な補修を施すことを目的とした、状態監視保全(CBM: Condition Based Maintenance)技術の導入も一部で進んでいます。

### 交流き電用避雷器の劣化診断

交流き電用避雷器(以下、避雷器といます)は、過電圧から電気設備を保護する目的で設置されており、がい管の内側に酸化亜鉛素子を封入しています(図2)。

避雷器が劣化すると電気設備故障につながるため、定期的に検査を行う必要があります。たとえば酸化亜鉛素子に流れる電流(抵抗分漏れ電流)が1mAを超過すると素子の劣化が進みやすくなり、発熱によりがい管が破損してしまう、あるいは所定の動作電圧より低い電圧で放電してしまうなどの障害が発生します。

使用電圧が比較的低い直流き電用避雷器では、避雷器へ電圧を印加した際に漏れ電流が1mAになるような値を動作開始電圧と定義し、その値の傾向から劣化を管理しています。また、測

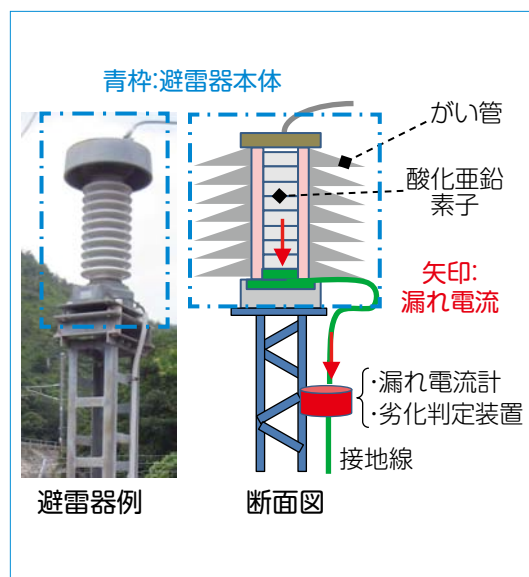


図2 避雷器の構造

定に必要となるのは数千Vの直流電圧であるため、可搬型の試験電源装置で十分対応可能です。一方、交流用避雷器の動作開始電圧は通常数万Vに達することから大きな試験電源装置が必要となり、現場での検査は容易ではありません。そこで代替措置として避雷器の接地線に流れる漏れ電流を使用中に測定し、その増減により保守管理しています。

避雷器に流れる漏れ電流には、酸化亜鉛素子に流れる抵抗分漏れ電流成分と、がい管近傍などを流れる静電容量分漏れ電流の成分があります。しかし、避雷器の物理形状の制約により抵抗分漏れ電流を単独で計測することはできません。また交流き電用避雷器に流れる静電容量分漏れ電流は直流の場合に比べて非常に大きいことから、酸化亜鉛素子の劣化を詳細に把握するためには、これまでは避雷器に加わる電圧から静電容量分漏れ電流を推定し、そのうえで抵抗分漏れ電流を演算する必要がありました。

さて、酸化亜鉛素子が劣化すると避雷器に加わる電圧が高い領域で漏れ電

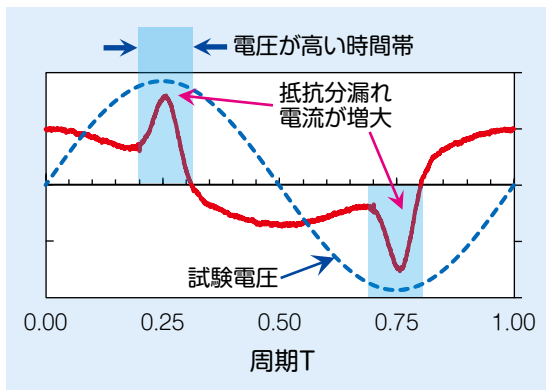


図3 酸化亜鉛素子劣化時の漏れ電流波形

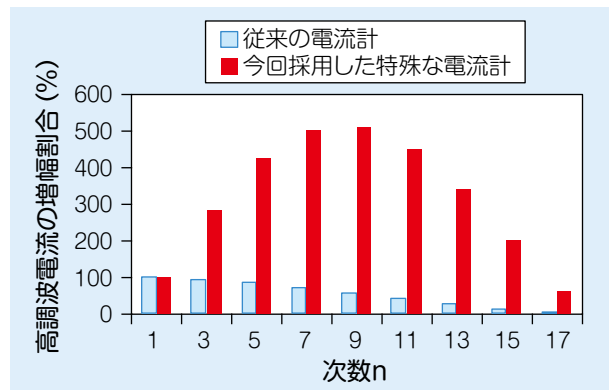


図4 特殊な電流計による劣化成分の増幅



図5 避雷器劣化判定装置の外観図

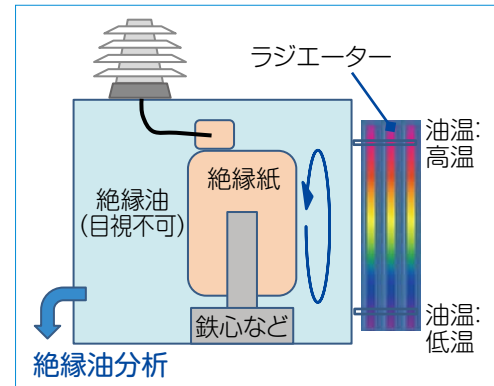


図6 変圧器の構造

流が増加し波形がひずむことがわかります(図3)。この漏れ電流波形のひずみは、ログウスキーコイルという特殊な電流計で計測すると15次前後までの奇数次高調波成分が連続的に増幅されるという特徴的なパターンとして検出されます(図4)。そこで今回この現象に着目した交流き電用避雷器の劣化評価を試みました<sup>2)</sup>。

避雷器劣化時に増加することが予想される、15次成分までの高調波を複数のバンドパスフィルターで検出し、複数の成分がしきい値を超過した場合に劣化と判定するアルゴリズムを考案しました。また、提案手法の機能を検証する目的で、上記アルゴリズムを実装した測定装置を試作しました(図5)。

酸化亜鉛素子とコンデンサーにより劣化した避雷器を模擬した試験を行いました。その結果、劣化判定機能が有効であることと、健全な避雷器による現地試験により誤判定のないことを確

認しました。本装置は10kg程度と小型軽量で、停電作業を伴わず、現場で簡易に診断が可能であるため、メンテナンスの低コスト化が図れます。

### 変圧器用絶縁紙の劣化診断

電気鉄道用変圧器は、電力会社からの数万Vの高電圧を、列車走行に適した電圧(たとえば交流25,000V)に変換する機能を有しています。一方、列車に電力を供給する際に変圧器の巻線や鉄心などで発熱が生じます。そこで、通常は絶縁油の中に巻線などを入れ、ラジエーターなどを通じて油を循環させ変圧器を冷却しています(図6)。

車両やトロリー線などで故障が生じた際には巻線に大きな故障電流が流れますが、その際の電磁力による巻線の変形を防ぐため、変圧器の巻線および巻線用絶縁紙は、電磁力に耐える機械強度を具備する必要があります。一方、絶縁油の温度が上昇すると、絶縁紙の

主成分であるセルロースが徐々に分解して機械強度が減少するため、変圧器の維持管理のためには劣化傾向を把握する必要があります。

ところで、一日の間で負荷の変動が少ない電力会社の変圧器と異なり、電気鉄道用変圧器の負荷はラッシュ時とそれ以外の時間帯で大きく異なる場合が多くなります。このため、電力会社の変圧器とは劣化傾向が異なることが予想されました。そこで、まず電気鉄道用変圧器における夏期最高油温などの運用環境について調査し、データベースを作成しました。

調査の結果、電気鉄道用変圧器の夏期最高油温は、変圧器の製品規格で定める限度値(周囲温度25℃+温度上昇55K=80℃)に比べ余裕があること(図7)、負荷の大きい朝のラッシュ時にはそれほど油温が上昇しておらず、昼から夕方にかけて最高油温となることがわかりました。

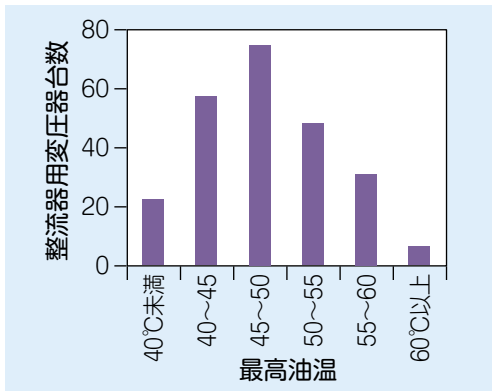


図7 整流器用変圧器の夏期温度特性

次に変圧器絶縁紙の余寿命評価について検討しました。絶縁紙の健全度は平均重合度という分子の結合具合を示す指標で示され、巻線の機械強度と相関があります。健全度の初期値を100%とすると、経年や油温上昇ともない数値が徐々に低下していくこととなります。また、絶縁紙の健全度は初期値に対して45%を下回ると機械強度を維持できなくなるためNG判定となります<sup>3)</sup>。今回、老朽化により解体された新幹線用油入変圧器の絶縁紙を採取し、絶縁紙の健全度を評価しました。

一般に変圧器の上部は比較的高温の環境になるため劣化しやすいといわれています。調査の結果、電気鉄道用変圧器については、同等の経年の電力会社の変圧器<sup>4)</sup>に比べそれほど劣化していないことがわかりました(表3)。

ところで、変圧器の内部は絶縁油が劣化しないように密閉されていますので、運用中に絶縁紙を採取することはできません。そこで絶縁油に溶解した油中フルフラールという分解物から絶縁紙の健全度を推定する手法がこれまで検討されています<sup>3)</sup>。フルフラールとは、絶縁紙の主成分であるセルロース分子から分解された有機物で、セルロースが劣化するにつれて絶縁油中に溶解していきます。

この手法については種々の推定特性が提案されていますが、電気鉄道用変

表3 文献調査および実測による変圧器巻線絶縁紙の健全度<sup>4)5)</sup>

経年	絶縁紙健全度の実測部位 (初期値の45%以下：寿命)		用途
	変圧器上部	変圧器下部	
34	56%	65%	電力会社 (※文献4)
37	50%	68%	電力会社 (※文献4)
36	65%	64%	電気鉄道用 -1
41	65%	66%	電気鉄道用 -2

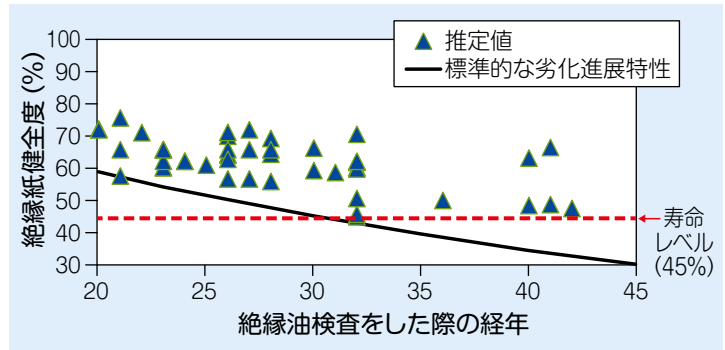


図8 変圧器経年と健全度推定値との関係<sup>5)</sup>

圧器に適した特性はこれまで不明でした。今回、表3で調査した絶縁紙の劣化データと、同じく採取した絶縁油の分析結果とを比較検証した結果、油温が高い電力会社設備を想定した推定特性(主に変圧器の上部から分解物が生成)ではなく、油温が低いことを考慮した推定特性(変圧器全体から分解物が生成)を適用すると比較的良好一致することがわかりました。

この特性を元に、鉄道事業者から提供を受けた絶縁油を用いて絶縁紙健全度を推定しました。一般に変圧器の寿命は30年といわれていますが、評価の結果、寿命レベルと同等かそれ以上の健全性を維持しておりました(図8)。健全度があまり低下していない個体群については寿命延伸の可能性があると考えます。

### まとめ

ここでは、鉄道における変電機器の保全手法と検査周期の概要を紹介するとともに、変電機器の劣化状況を評価する最近の研究成果の一例として、避

雷器と変圧器に関する取り組み事例を紹介いたしました。引き続き電気鉄道用変電所の信頼性向上と長寿命化に向けて、さらなる研究を行っていく予定です。

最後に、設備運用データの提供や現地試験にご協力いただいた関係各位に謝意を示します。RRR

### 文献

- 金子力, 大雲響生: 鉄道事業者における変電設備保守の取り組み状況について, 平成21年電気学会全国大会講演論文集分冊5(電気機器), pp.14-17, 2009
- 赤木雅陽, 田中弘毅, 今村英樹: 新幹線変電所の避雷器故障予兆検出装置の開発, 第23回鉄道技術連合シンポジウム S7-4-1, 2016
- 電力用変圧器保守管理専門委員会: 油入変圧器の保守管理, 電気協同研究, Vol.54, No.5, 1999
- 三橋貞臣, 和田元生, 岩上守彦, 伊藤幸二: 変圧器各部の絶縁紙平均重合度の分布, 平成11年電気学会全国大会講演論文集分冊5, pp.411-412, 1999
- 赤木雅陽, 吉井剣, 今村英樹: 鉄道の運用環境を考慮した変圧器余寿命評価, 鉄道総研報告, Vol.31, No.2, pp.5-10, 2017