

真空コンタクタ用真空バルブの抵抗安定化技術

Technology to Achieve Stable Contact Resistance of Vacuum Interrupters Used in Vacuum Contactors

森 義憲 MORI Yoshinori 吉田 剛 YOSHIDA Takeshi 齋藤 卓也 SAITO Takuya

真空バルブは、真空開閉機器の開閉部に用いられ、特に、電気接点に銀(Ag)-タングステンカーバイド(WC)系複合材料を適用した真空バルブは、優れた遮断性能と低サージ性能を実現している。真空開閉機器のうち、“真空コンタクタ”は、真空遮断器に比べて電気接点の開閉動作が多頻度であるため、機械的耐久性及び経時的な抵抗安定性も合わせて要求される。

東芝は、電気接点が真空中で接触／開離することにより生じる凝着現象に伴う電気接点表面の性状変化が、真空バルブの機械的耐久性及び抵抗安定性に影響を与えることを明らかにした。この要因に基づいて改良を施した電気接点を真空バルブに適用し、実機を用いた長期性能評価により検証した結果、安定した抵抗値を示すことを確認した。

Vacuum interrupters are commonly used in switchgear supporting electric power equipment. In particular, those with silver-tungsten carbide (Ag-WC) electrical contacts feature high breaking and low surge performance. However, as vacuum contactors are among the main types of switchgear required for more frequent switching operations than vacuum circuit breakers, vacuum interrupters must not only achieve high mechanical durability but also suppress long-term changes in contact resistance.

Against this background, Toshiba Corporation has focused on adhesion phenomena that tend to occur during the opening and closing of electrical contacts in a vacuum, and has clarified that changes in the surface properties of electrical contacts affect the mechanical durability and stable contact resistance of vacuum interrupters. Evaluation experiments on the long-term performance of actual equipment using newly developed Ag-WC electrical contacts based on this study have confirmed that they achieve stable contact resistance for a prolonged period.

1. まえがき

近年、産業設備の高効率化・高信頼性の観点から、中圧から低圧までの電圧領域における電力機器の性能向上が求められている。モーター駆動装置やヒーター、コンデンサー設備などの開閉制御に用いられる真空コンタクタは、優れた信頼性、保守性、及び遮断性能を兼ね備えていることから、産業分野を中心に広く採用されている。真空コンタクタの開閉部の構成要素である真空バルブ(図1)は、固定軸及び可動軸の電気接点を真空容器に封入した構造を持ち、電流遮断時に発生するアークを真空中で急速に消弧させる原理によって、高い遮断性能を実現している。

東芝は、真空コンタクタ用真空バルブの電気接点にWCとAgを含むAg-WC系複合材料を適用することで、低抵抗かつ優れた遮断性能と低サージ性能の両立を実現している。一方で、真空コンタクタは頻繁に電気接点の開閉動作を行う用途で 사용되는ことが多いため、真空コンタクタ用真空バルブの電気接点には、前述の電気的性能に加えて、多頻度開閉動作に耐える機械的耐久性及び経時的な抵抗安定性も要求される。

当社は、電気接点の表面性状である表面粗さ(R_a)と接触

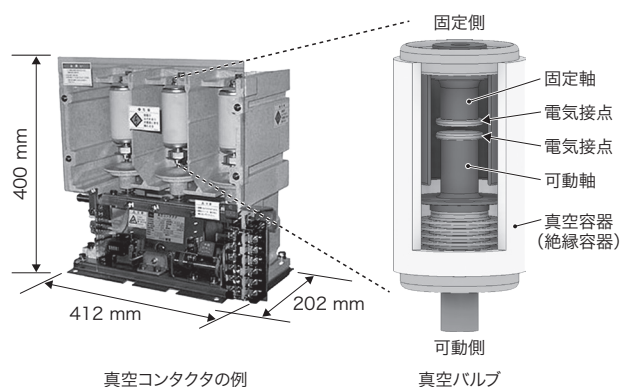


図1. 真空コンタクタ用真空バルブの構造

真空遮断器や真空コンタクタに搭載される真空バルブは、固定軸及び可動軸先端にろう付けされた電気接点が、絶縁容器中对向して配置され真空封入された構造となっている。

Structure of vacuum interrupter for vacuum contactors

面の形状(球面、平面)がそれぞれ機械的耐久性及び抵抗安定性に与える影響を明らかにした。

ここでは、開閉動作に伴う抵抗と電極表面性状の変化の関係について述べ、更に、表面性状を最適化して新たに開発した電気接点及び真空バルブの実機を用いた長期性能評

価結果について述べる。

2. 開閉動作によって抵抗が変化する要因

真空コンタクト用真空バルブの可動軸及び固定軸の先端には、導電性と低サージ性に優れるAg-WC系電気接点を取り付けられている。電気接点の形状と真空バルブの開閉動作の概略を、図2に示す。電気接点は過電流による電気接点同士の溶着や固着を防ぐため、接触面が球面形状となるように旋盤加工で表面を仕上げている。真空バルブの開閉動作では、真空容器内の電気接点が接触／開離することで電流のオン／オフを機械的に制御する。通常、真空環境下で接触する機械要素には、異種材料の選択や摩擦係数の小さい固体潤滑材などの使用が望ましいとされているが、真空バルブは電気接点を閉じているときの電気接点間の抵抗を小さくするため⁽¹⁾、電気接点に同じ材料が使用される。更に、同じ材料同士の接触では特に凝着が発生しやすいため、頻繁に開閉動作を伴う場合には、接触面での凝着摩擦による表面損傷が避けられない。この表面損傷が抵抗の変化に与える影響を調べるため、開閉動作後の真空バルブを分解して電気接点の状態を観察した。抵抗の変化が認められた真空バルブの電気接点表面の画像と球面補正後の3次元(3D)形状を、図3に示す。電気接点の接触面には、高さ又は深さが20～40 μm程度の凝着痕(凹凸)が、固定側と可動側のそれぞれに形成されていた。この凹凸は、電気接点の表面粗さと比較して10倍以上大きい値である。また、これらの凹凸は電気接点の中心から数mmずれた箇所形成されており、固定側と可動側の中心軸が僅かに傾いて接触していたと考えられる。

この観察結果から考えられる真空バルブの抵抗変化過程

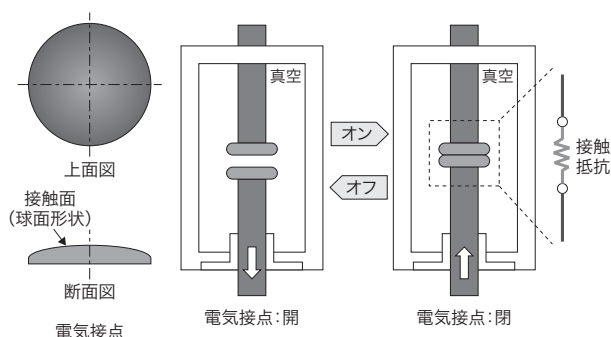


図2. 電気接点の形状及び真空バルブの開閉動作

電気接点の接触面は球面形状であり、固定側と可動側の電気接点を接触／開離させることで、電流のオン／オフを機械的に制御している。接触時には電気接点間に接触抵抗が生じる。

Outline of electrical contacts and opening/closing operations of vacuum interrupter

を、図4に示す。真空バルブ内部では固定軸と可動軸は図4(a)のように同軸上に配置されており、通常であれば電気接点の中心同士が接触する。しかし、図4(b)に示すように、真空コンタクトの操作機構に接続された可動軸が僅かに傾いて動作すると、可動軸の電気接点は中心からずれた位置で固定軸の電気接点に接触する。これにより接触部には微小な滑りと凝着摩擦が生じ、それぞれの電気接点の表面に、図4(c)に示すような凹凸が形成される。更に、可動軸の傾斜が変化してこの凹凸の位置がずれて接触すると、図4(d)のように接触面積が著しく減少し、通電時の抵抗が変化すると考えられる。

これらのことから、真空バルブの抵抗を安定化させるためには、開閉動作によって生じる電気接点の表面損傷(凝着摩擦)を抑制することがポイントになると考えられる。一般的に、機械要素の摩擦を抑制するには、(1)摺動(しゅうどう)面の潤滑、(2)摺動部の設計変更、(3)摺動部の材料変更が有効である。ここでは(2)摺動部の設計変更として、電気接点の表面性

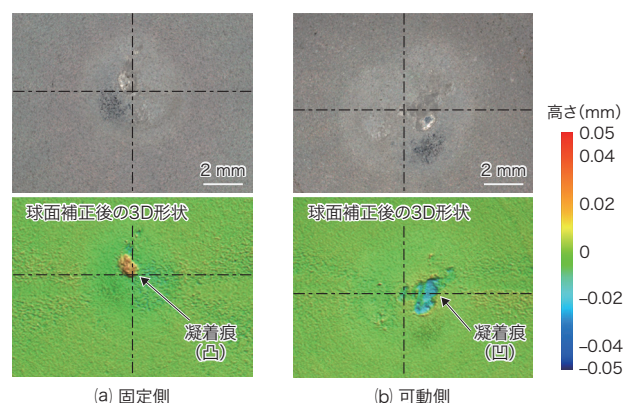


図3. 開閉動作後のAg-WC系電気接点の表面損傷

真空環境下で頻繁に接触／開離を繰り返すため、開閉動作後のAg-WC系電気接点表面には高さ又は深さが20～40 μm程度の凹凸が可動側と固定側のそれぞれに形成されていた。

Surface damage of Ag-WC electrical contacts after switching operations

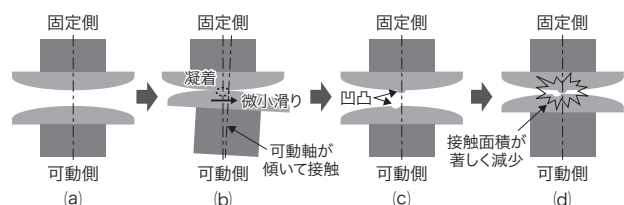


図4. 真空バルブの抵抗変化の過程

可動軸が僅かに傾いて電気接点が中心からずれた位置で接触することで接触部に微小な滑りが生じ、凝着摩擦痕(凹凸)が形成される。この凹凸が抵抗変化の要因となる。

Resistance change process caused by surface damage of electrical contacts during switching operations

状を最適化することで、その機械的耐久性の向上及び抵抗の安定化を目指した。

3. 電気接点の表面性状が抵抗変化に与える影響

3.1 電気接点の表面粗さ

電気接点の表面粗さが抵抗変化に与える影響を明らかにするため、接触面の表面粗さが異なる電気接点を4種試作し、それぞれ真空バルブに組み込んで負荷電流を通電せずに機械的に開閉を繰り返す無負荷開閉試験を実施した。無負荷開閉試験は真空バルブを直動式の操作機構に接続し、模擬的に開閉動作を加えて10, 50, 100, 300回目の抵抗値をそれぞれ3回計測する要素試験である。真空バルブ(各9本)の無負荷開閉試験結果を図5に示す。表面粗さを $R_a 0.2 \mu\text{m}$ 及び $R_a 1.6 \mu\text{m}$ とした電気接点を組み込んだ真空バルブは、開閉回数の増加とともに抵抗値が増加する傾向を示し、300回開閉後の抵抗値は初期抵抗値の2~3倍の数値まで変化した。表面粗さを $R_a 6.3 \mu\text{m}$ とした電気接点を組み込んだ真空バルブは、100回開閉まで抵抗値の変化が認められなかったが、300回開閉までに抵抗値の変化が増大した。表面粗さを $R_a 25 \mu\text{m}$ とした電気接点を組み込んだ真空バルブは、抵抗値の変化が小さく、300回開閉後も抵抗値は初期抵抗値からほとんど変化していなかった。

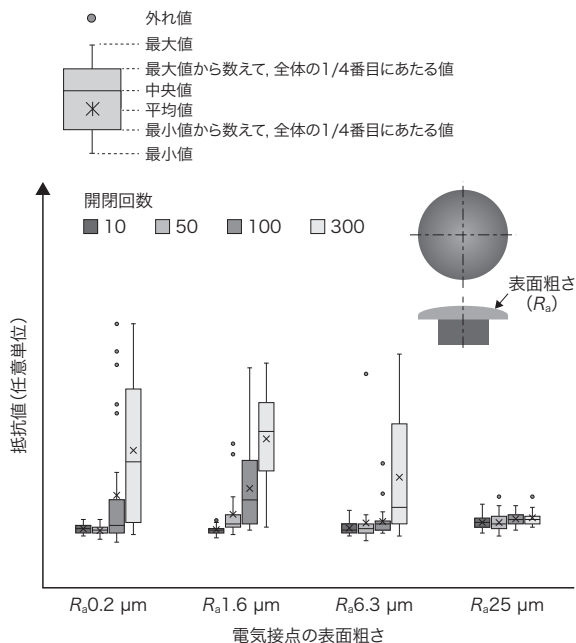


図5. 電気接点の表面粗さが抵抗変化に与える影響

電気接点の表面粗さを大きくすることで、開閉回数の増加による抵抗変化が小さくなることが分かった。

Relationship between electrical contact surface roughness and resistance change

これらの結果から、電気接点の表面粗さを大きくすることで開閉動作による抵抗変化が小さくなることが分かった。なお、無負荷開閉試験後の真空バルブを分解して電気接点を観察したところ、表面粗さを大きくすることで凝着摩耗による表面損傷が抑えられており^[2]、電気接点の機械的耐久性向上に有効な対策であると考えられる。

3.2 電気接点の表面形状

電気接点の表面形状が抵抗変化に与える影響を明らかにするため、電気接点の接触面が平面形状の電気接点を試作し、真空バルブに組み込んで、無負荷開閉試験を実施した。真空バルブ(各3本)の無負荷開閉試験結果を図6に示す。固定軸及び可動軸の電気接点の形状は図中の4通りの組み合わせとし、接触面の表面粗さは $R_a 1.6 \mu\text{m}$ とした。固定軸と可動軸の電気接点をいずれも平面形状とした組み合わせの場合、50回開閉までの抵抗値は従来の球面形状同士よりも低い値を示したが100回開閉以降はやや抵抗値の変化が大きくなる傾向を示した。平面形状と曲面形状の組み合わせにおいて、可動軸の電気接点を平面形状とした場合では、300回開閉まで抵抗値は低く安定していたが、逆に固定軸側を平面形状とした場合では開閉回数の増加とともに抵抗値が大きく増大する傾向を示した。可動軸の電気接点を平面形状とした場合だけ抵抗が低く安定していた要因として、この組み合わせでは可動軸が傾いて接触した場合に接触部での滑りが抑制されて凝着が生じにくいことが挙げられる。また、従来の球面形状同士の組み合わせに比べて、その他の組み

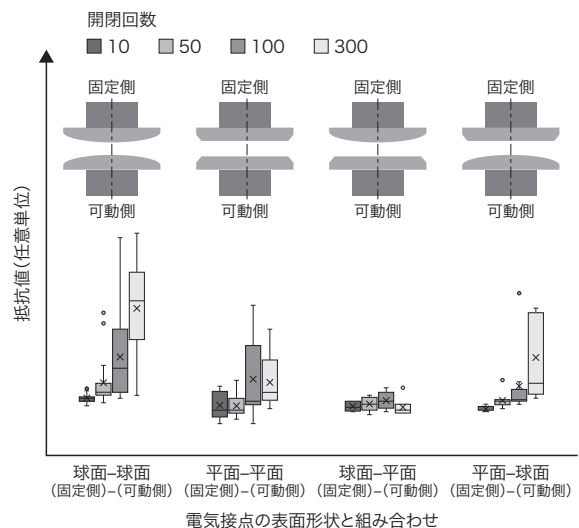


図6. 電気接点の表面形状が抵抗変化に与える影響

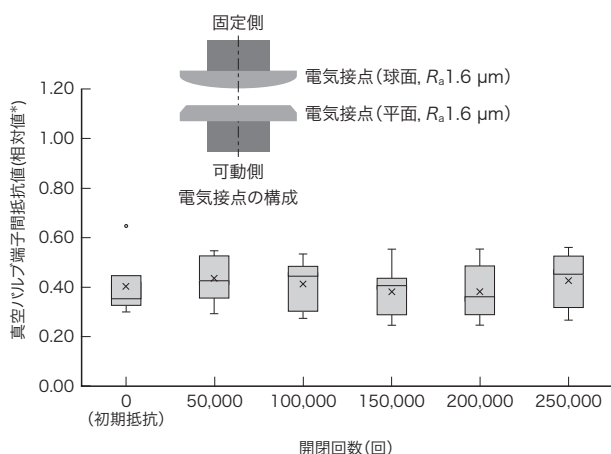
固定軸の電気接点を球面形状、可動軸の電気接点を平面形状とすることで開閉回数の増加による抵抗変化が小さくなることが分かった。

Relationship between electrical contact surface profile and resistance change

合わせは初期抵抗値の平均値がおおむね小さい値を示した。これは片側及び両側の電気接点の表面形状を平面としたことによって接触面積が増加したことが要因と考えられる。

4. 最適仕様の長期性能評価

3章で示した電気接点の表面粗さ4条件と表面形状4条件を組み合わせた16条件について、それぞれ無負荷開閉試験で抵抗変化を比較した。その結果、電気接点の表面粗さを $R_a 1.6 \mu\text{m}$ とし、固定軸に球面形状、可動軸に平面形状の電気接点を用いた構成において、抵抗の変化が最も小さくなることが分かった。そこで、この電気接点を組み込んだ真空バルブの長期性能を実証するため、真空コンタクトを用いた実機試験を実施した。評価用の真空バルブは真空コンタクトの3相電路にそれぞれ接続し、無負荷で開閉回数250,000回までのバルブ間抵抗値を計測した。実機試験の結果を、図7に示す。バルブ間抵抗値は初期から開閉動作250,000回まで抵抗の変化が小さく、製品の出荷基準値以下でおおむね安定して推移していた。この結果から、今回新たに開発した電気接点を適用した真空バルブは、実機を用いた無負荷開閉動作においても長期的に安定した抵抗値を示すことを実証できた。



*製品の出荷基準値を1.0とした場合の相対値

図7. 実機の真空コンタクトを用いた長期性能評価の結果

新たに開発した電気接点を適用した真空バルブは、実機による250,000回の無負荷開閉動作試験でも抵抗変化が小さく、製品の出荷基準値以下でおおむね安定した抵抗値を示した。

Results of long-term evaluation experiments using actual equipment with new Ag-WC electrical contacts

5. あとがき

これまで不明確であった真空コンタクト用真空バルブの抵抗が経時的に変化する要因を明らかにした。そして、真空バルブに使用される電気接点の表面粗さと表面形状が抵抗安定性に与える影響を明らかにし、両者を最適化することで電気接点の材料組成を見直すことなく抵抗の安定化が可能であることを実証した。引き続き、電気接点の構成材料についても抵抗に与える影響を明らかにし、真空コンタクト並びに真空バルブの性能及び信頼性の向上に貢献していく。

文 献

- (1) 玉井輝雄, 電気接触現象とその表面・界面-接触機構デバイスの基礎と応用-, コロナ社, 2019, 270p.
- (2) 森 義憲, ほか, “電気接点材料の表面粗さが接触抵抗特性および耐凝着性に与える影響”, トライボロジー会議2022秋, 福井, 2022-11, 日本トライボロジー学会, 2022, CD-ROM F1.



森 義憲 MORI Yoshinori
総合研究所 先端デバイスR&Dセンター 機械・システム研究部
日本機械学会・日本トライボロジー学会会員
Mechanical Systems R&D Dept.



吉田 剛 YOSHIDA Takeshi
産業システム事業部 配電システム営業・技術部
Distribution Systems Sales & Engineering Dept.



齋藤 卓也 SAITO Takuya
産業システム事業部 スイッチギヤ部
Switchgear Dept.