

有接点機器の長寿命化とその寿命予測

潮崎 克郎(しおさき かつろう)

河原木 豊(かわらぎ ゆたか)

宮沢 秀和(みやざわ ひでかず)

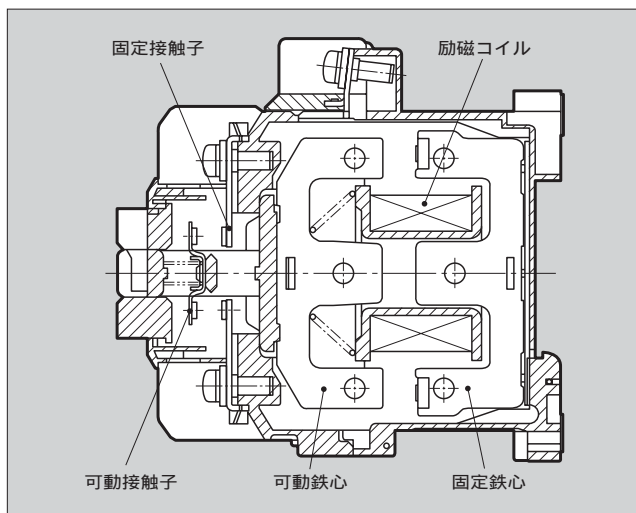
1 まえがき

近年のグローバル化の中にあつて、有接点機器、とりわけ低圧開閉機器を取り巻く情勢は地球環境保護や安全規格の国際化などの動きを受け、大きく変化しつつある。富士電機ではこれらの変化にいち早く呼応し、必要な要素技術の確立を図りながら電磁接触器、配線用遮断器など低圧設備を支える各種コンポーネントの開発を行ってきた。これらの開発の中で有接点機器の長寿命化の取り組みは、国際性および環境性を追求した新商品を実現させるうえで重要な意味を持っている。

この長寿命化に関する研究は従来から行われてきているが、その観点は電流遮断時の現象解析を中心としたものが主流である。富士電機では開閉機器の開路と遮断の両面から現象をとらえて解析・評価に取り組んできた。

本稿では有接点機器の代表格である電磁接触器の電気的寿命(新JIS用語:電気的耐久性)を取り上げ、長寿命化を支える要素技術、寿命予測技術、最近の寿命評価設備の概要などについて紹介する。図1に小型電磁接触器の構造の一例を示す。

図1 小型電磁接触器の構造例



2 電磁接触器の接点消耗メカニズム

2.1 電磁接触器の適用負荷

交流電磁接触器における適用負荷の種別は、JIS C 8201-4-1の表1において次のように分類されている。

- (1) AC-1: 無誘導又は低誘導負荷, 抵抗炉
- (2) AC-2: 巻線形モータの始動, 停止
- (3) AC-3: かが形モータの始動, 運転中の停止
- (4) AC-4: かが形モータの始動, ブラッキング, インチング

これらの適用負荷の中で、実使用上最も適用の多いものはAC-3であり、要求される寿命回数も多い。

2.2 AC-3条件における接点消耗メカニズム

図2に示すオシログラムは、電磁接触器にて三相かが形モータを始動、停止(AC-3条件)した場合の電圧と電流の観測波形例である。始動時には一般に定格電流の6倍程度の電流を投入し、停止時は定格電流を遮断する。電流遮断後の極間電圧(接点間の電圧)は、モータの回転の減速に伴って緩やかに上昇し、完全停止の時点で商用周波回復

図2 かが形モータを始動、停止した場合のオシログラムの例



潮崎 克郎

受配電機器、制御機器の開発試験を経て、材料および機器の要素技術開発に従事。現在、機器・制御カンパニー電源・機器事業部技術開発・生産センター開発部担当部長。電気学会会員。



河原木 豊

電磁開閉器の開発試験に従事。現在、機器・制御カンパニー電源・機器事業部技術開発・生産センター品質保証部担当課長。電気学会会員。



宮沢 秀和

電磁開閉器の開発試験に従事。現在、機器・制御カンパニー電源・機器事業部技術開発・生産センター品質保証部。電気学会会員。

電圧値に至る。

このような条件で閉路される電磁接触器の接点は、閉路時と開極時に発生するそれぞれのアーク熱によって消耗する。そのメカニズムの概要を図3に示す。

まず、閉路時には接触子同士および鉄心同士の衝突による接点バウンスが発生する。この現象は微小ギャップでの始動電流開閉であり、接点は酸化されにくい状況下で間欠アークにさらされ、押しつぶされるような形で消耗する。次いで接点は安定した接触状態を保って通電を維持し、この状況下での接点消耗は生じない。開極時には遮断アークが発生し、一時的なこう着（アークが接点面近傍に停滞）時間を経て伸長・冷却され、接点上から駆動されて消滅に至る。この過程において接点は溶融・蒸発を伴って消耗する。

小型、中型の電磁接触器における電氣的寿命は、接点バウンスの大きさにより閉路時の消耗が大きく関与する。この現象は遮断時には極間電圧が低く、アークエネルギー的に楽な状態になっていることが影響している。

③ 有接点機器の長寿命化

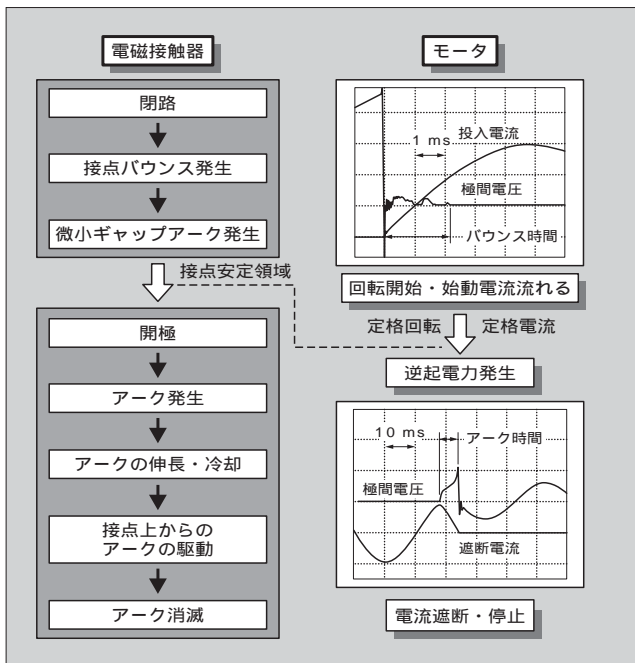
3.1 長寿命化を支える要素技術

電磁接触器の電氣的寿命は、絶縁劣化や開閉機構部の損耗・変形などの影響を受ける場合があるが、主として主接点の消耗によって決定される。電氣的寿命を効率的に狙いどおりの性能にもっていくには、技術データに基づく高度な解析・評価技術が要求される。

富士電機では、接点消耗を抑制した長寿命化の達成手段として以下に記す要素技術の確立に取り組んできた。

- (1) 接点バウンス低減技術（振動解析）
- (2) 接点材料の高性能化

図3 接点消耗メカニズム



- (3) アーク駆動技術（接点面のアークを速やかに移動）
- (4) アークエネルギーの抑制技術
- (5) アークエネルギーが接点消耗に及ぼす影響度の解析技術
- (6) 三相均等化消耗技術（接点を有効に使いきる）
- (7) 電氣的寿命予測技術

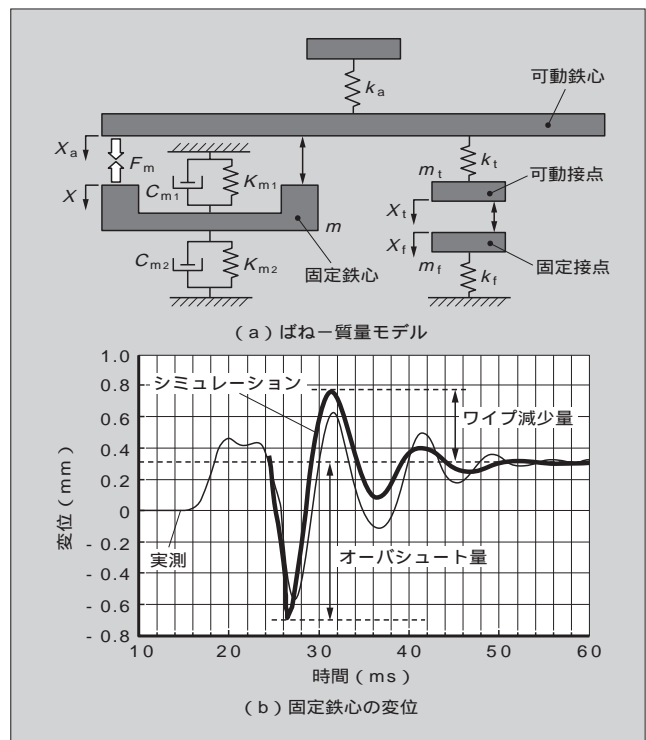
これらの要素技術の中から、本稿では小型電磁接触器における代表事例として1),(2)および7項について述べる。

3.2 接点バウンス低減技術

先に述べたように、AC-3条件での開閉動作の中では閉路時の接点消耗がかなり電氣的寿命に関与している。したがって、閉路時の接点バウンス低減が長寿命化を図るうえで効果的であることから、電磁接触器の全体構造を考慮した「バウンスシミュレーション技術」を開発した。

図4は電磁石部における固定鉄心の挙動解析のための簡易なばね-質量モデルとその解析結果の事例である。この解析結果と、図5に示すばね定数とクッション性能の関係から、接点バウンスは接点部だけではなく電磁石部を含むクッション系全体の最適化によって達成できることを確認した。固定鉄心のオーバーシュート量と接点バウンス時間の関係は、ばね定数の変化に対してトレードオフになっていることから、解析結果に基づいて最適値にコントロールしている。この事例のようにバウンスシミュレーションの解析結果は、部品ばらつきなどに影響を受けにくいロバスト設計へ活用されている。効果として接点バウンス時間を約30%低減することができた（寿命20%延長）。

図4 ばね-質量モデルと解析結果の例



3.3 接点材料の高性能化

前節で接点バウンス低減による長寿命化について述べたが、接点材料の高性能化も寿命延長の大きな達成手段である。図6は2種類の接点の断面写真の例である。この写真は代表的な内部酸化法によって製作された接点を示す。右図は改良品であり、結晶組織が細かく、それぞれの結晶粒の中に針状結晶が見られ、組織の緻密(ちみつ)さや均一分散を示している。これらには原材料の配合割合、溶解条件、圧延焼鈍条件および酸化雰囲気など種々の製造条件が関与してくる。富士電機では、これらを適切に制御することによって接点のミクロ構造にまで立ち入った材料開発を行い、接点の電気的性能向上を実現した。

接点の性能は通常「接触抵抗」「消耗性」「耐溶着性」で表されるが、上記の最適化によって接点性能を10~20%向上させ商品の高性能化に寄与した。

3.4 電気的寿命予測技術

これまで接点長寿命化のための二つの事例について紹介した。本節では電気的寿命の予測技術について述べる。この技術は長期の評価期間を要する寿命試験において、初期データを活用して短期間に寿命推定を行うものである。開発段階において寿命決定にかかわる各種仕様変更フレキシブルに対応でき、開発期間の短縮や製品コストの削減に

図5 ばね定数とクッション性能の関係

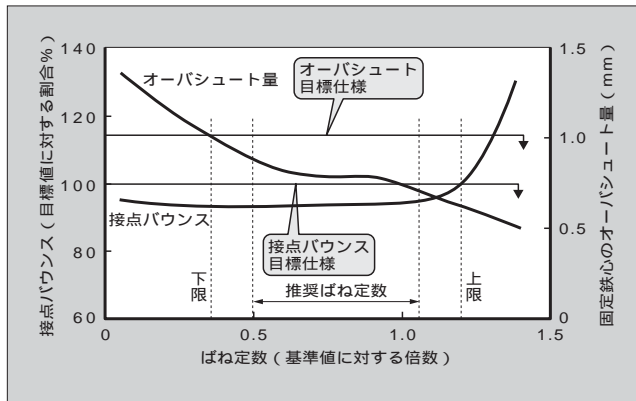
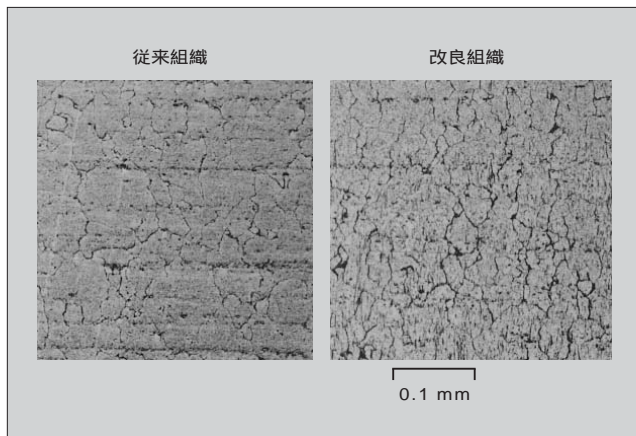


図6 接点の断面写真の例



貢献できる。

3.4.1 AC-3 条件における寿命予測方法

この方法は蓄積データを基に作成されたマスターカーブを利用するものであり、開閉条件の異なる試験においても予測が可能である。小型電磁接触器における予測手段の概要を以下に述べる。

(1) アークエネルギーと接点消耗の関係をマスターカーブ(図7)として作成する。

なお、実負荷接点バウンス時間とアークエネルギーの関係を実例として図8に示す。

(2) マスターカーブのX、Y軸に対象となる供試器の1回あたりの平均アークエネルギーと限界消費量をプロットする。

(3) 上記2点を延長した交点から寿命回数を予測する。ただし、この寿命予測を行うにあたっては蓄積データに基づいて次の仮定を行っている。

- 三相中の最大消耗相で判断する。
- 接点寿命となる限界消費量は、事前に初期ボリュームに対する割合として決定しておく。
- 1回あたりの平均アークエネルギー(閉路時+遮断)は開閉の進行に伴う変動を考慮し、初期データにある係数を乗じたものを用いている。

3.4.2 過酷度の概念を盛り込んだ予測技術の信頼性向上

電磁接触器のAC-3条件での三相開閉は、コイル励磁位相がランダムの場合においても特定相に接点消耗の偏りを生じることがある。これは主回路投入位相がある特定相範囲内に集中するためであり、電磁接触器の動作時間特

図7 寿命推定用マスターカーブ

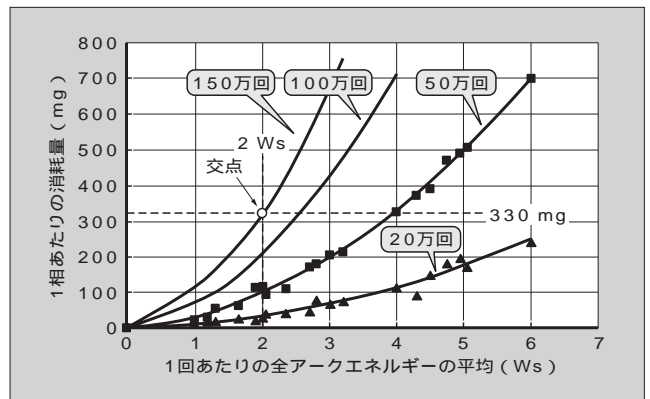
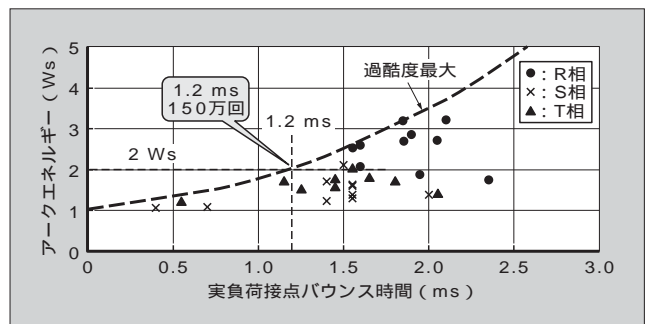


図8 実負荷接点バウンスに対するアークエネルギー



性に起因する現象である。

この各相間の消耗ばらつきは、以下に記す過酷度の概念によって予測することができ、前項の方法と併用することで予測技術の信頼性を高めることができる。

「過酷度」とは、接点消耗に対する厳しさを表す度合であり、次式により求めることができる。

過酷度を σ とすると、

$$\sigma = S \cdot \omega^2 \dots\dots\dots(1)$$

$$S = I_m \sqrt{2 + 2 \cdot \cos(\theta - \phi)} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 S ：投入電流突進率 dI/dt

I_m ：投入電流波高値 (A)

θ ：投入位相角 (rad)

ϕ ：力率角 $\tan^{-1} L/R$ (rad)

ω ： $\tan^{-1} \omega / \dots$ (rad)

ω ：可動接触子の衝突速度 (m/s)

この式は、閉路時の接点消耗量は励磁位相によって決まる投入電流の dI/dt と可動接触子の衝突速度の二乗の積に比例して増加することを表している。

各相の過酷度 σ は ω の実測と S の計算によって求めることができ、事前に各相間の寿命比較を予測できる。この技術は三相間のアンバランス消耗の抑制に役立っている。

上述した寿命予測方法の活用によって短期間に試作品の性能評価を行い、タイムリーな商品開発を実践している。

4 電気的寿命評価設備

富士電機は、有接点機器の長寿命化に取り組み、安全性や環境保護などを考慮した技術開発を推進してきた。これらの評価・解析に使用される設備や計測器類については、時流にマッチした最新の技術を取り入れ、常に信頼性の高

いデータを取得、供給できる体制を築いている。ここでは前章で述べた電磁接触器の寿命予測などに用いた電気的寿命試験装置の概要について述べる。

この試験装置は、IEC60947-4-1 および新 JIS (JIS C 8201-4-1) に準拠した試験を実施できるほか、各種個別要求の試験に対応できる。図9にその外観と解析データ処理画面の一例を示す。主な特徴は次のとおりである。

(1) アーク現象自動計測装置の導入

試験装置は供試器を開閉する試験盤とアーク現象解析装置から構成されており、開閉回数と累積アークエネルギー (543 ページの「解説」参照) の関係を三相同時に自動で計測できる。取込みデータは目的に応じて、閉路のみ、遮断のみ、閉路+遮断の三つのモードで解析ができる。その他のデータ処理アイテムとしてアークタイム、アークパワー、電流二乗積、実負荷接点バウンス時間などの計測が

図9 電気的寿命試験装置の外観とデータ処理画面

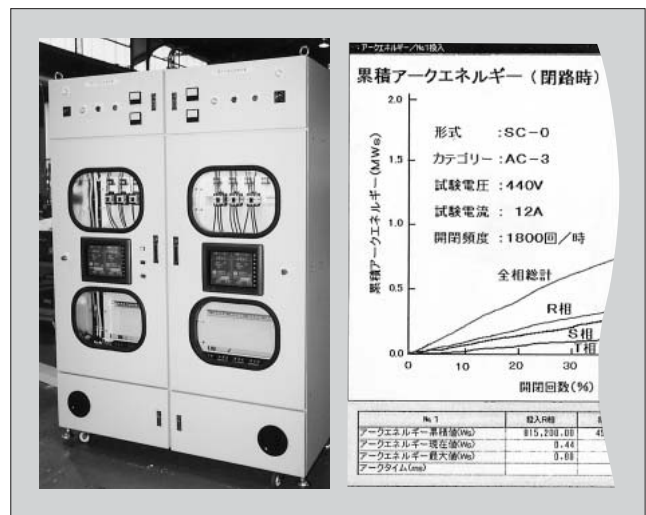
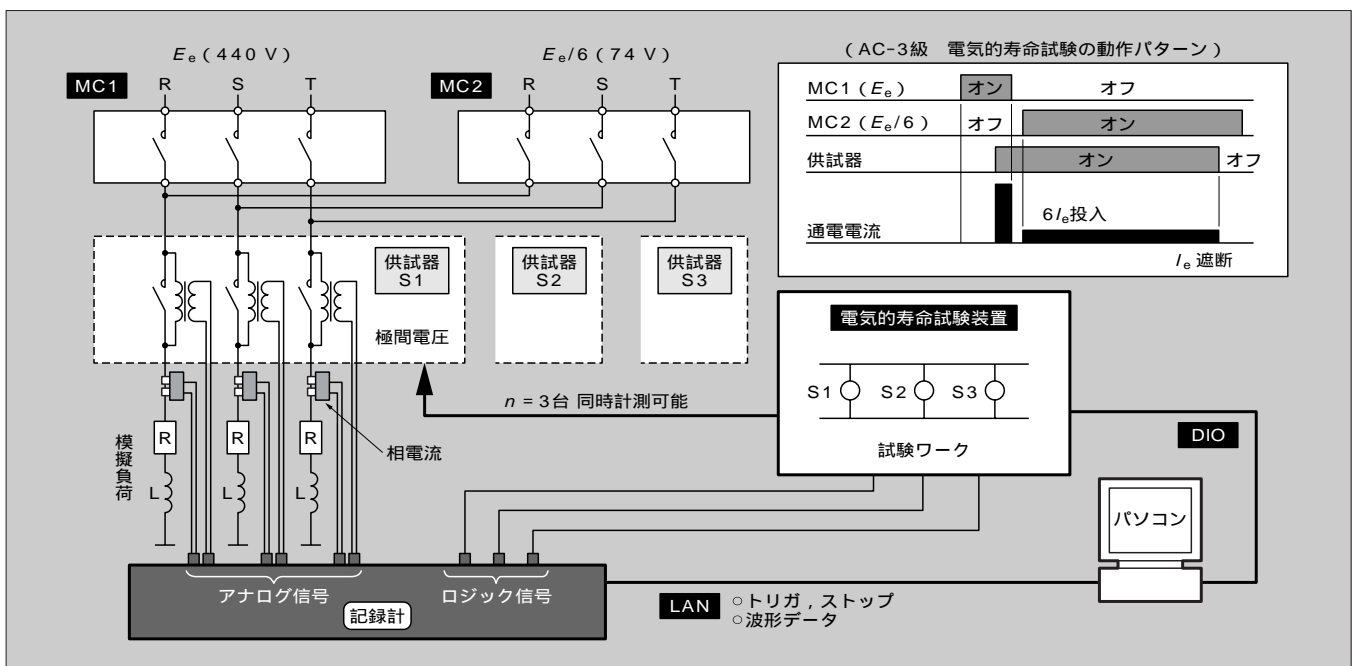


図10 アーク現象自動計測装置の回路構成



可能である。システムとしての試験回路構成を図10に示す。

(2) 試験電圧範囲の拡大

IEC 規格の内容に一致した新 JIS 規格への対応として試験電圧範囲の拡大を行っており、最高で主回路 690 V までの試験が可能である。

(3) 制御条件のフレキシブルな対応

電氣的寿命試験は適用される負荷や開閉頻度によって制御条件が規格で定められているが、評価の内容によっては特殊な制御条件が必要となる場合がある。本装置ではこのような場合に備えて、POD (操作表示器) 画面からの簡単な入力操作で任意の条件に設定変更ができるようになっており、フレキシブルな対応ができる。

以上で述べた寿命試験装置は、有接点機器の開閉性能の解析・評価に重要な役割を果たすものであり、今後とも商品開発の基盤評価設備として効果的な活用が期待される。

5 あとがき

有接点機器の代表機種として電磁接触器を取り上げ、長寿命化のための取組み、その予測技術、最近の寿命評価設備の概要について述べた。

有接点機器の長寿命化は、必要とする寿命を最小限の部材およびボリュームで実現させる技術開発でもあり、エコロジカルな商品開発の一端である。今後とも多様化する市

場のニーズに合致した信頼性の高い商品の供給に向けて、鋭意取り組んでいく所存である。

本稿が低圧開閉機器を実際に使用されている需要家各位のご参考になれば幸いである。最後にご指導・ご協力を賜った関係各位に深謝する次第である。

参考文献

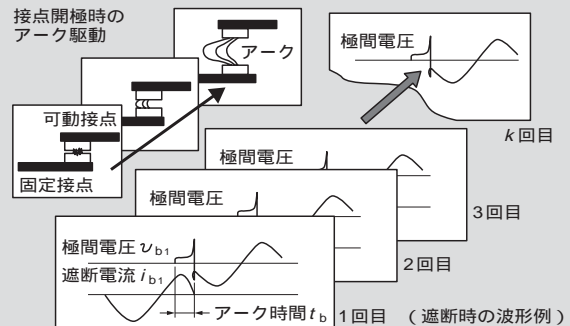
- (1) 伊藤昭吉ほか．電磁接触器のアーカ磁気駆動力の三次元有限要素解析．平成 8 年電気学会全国大会講演論文集．1996．
- (2) 森貞次郎ほか．アーカ電流が気中銅電極の消耗に及ぼす影響．電気学会論文誌 B．vol.119, no.5, 1999, p.596-604．
- (3) 青山淳憲ほか．冷却を行った円筒円環電極間を走行するアーカによる電極損耗量特性．平成 14 年電気学会全国大会講演論文集．2002．
- (4) 三ツ口邦夫ほか．柱上用 6 kV ガス開閉器の負荷開閉可能回数の推定．電気学会論文誌 B．vol.122, no.2, 2002, p.238-242．
- (5) 小嶋明比古．低圧開閉機器の技術動向と富士電機の対応．富士時報．vol.74, no.11, 2001, p.596-603．
- (6) 広田耕人ほか．NEO SC シリーズ新中形電磁接触器，富士時報．vol.72, no.7, 1999, p.363-369．
- (7) JIS C 8201-4-1．低圧開閉装置及び制御装置．第 4 部：接触器及びモータスタータ．第 1 節：電気機械式接触器及びモータスタータ．

解説 累積アーカエネルギー

有接点機器において負荷電流を開閉すると、接点の開離と同時に接点間にアーカが発生し、アーカ電圧が現れる。このときに発生するエネルギーはアーカ電圧とアーカ電流の積を時間で積分した値となり、アーカエネルギーと呼ばれる。

有接点機器の接点消耗は、このエネルギーによって影響を受ける。アーカエネルギーはその一部が接点を溶融・蒸発させるとい形で消費される。他に接点部周辺の側壁や空気を暖めたり、端子台の温度を上昇させたりする。有接点機器の長寿命化は、発生したアーカエネルギーをできるだけ接点消耗に関与しない部分で消費させることが大きなポイントである。

累積アーカエネルギーとは、目標とする回数までの毎回のアーカエネルギーの総計であり、接点寿命の解析において基礎となる重要なデータである。



$$\text{累積アーカエネルギー} = \sum_{n=1}^k \left(\int_0^{t_c} c_n i_{c_n} dt + \int_0^{t_b} b_n i_{b_n} dt \right)$$

t_c : 閉路時の接点バウンス時間, t_b : 遮断時のアーカ時間,
 k : 累積数 (設定した開閉回数),
 c_n : n 回目における閉路時の極間電圧, i_{c_n} : n 回目における閉路時の電流,
 b_n : n 回目における遮断時の極間電圧, i_{b_n} : n 回目における遮断時の電流