

称号及び氏名	博士（工学） 橋本 裕明
学位授与の日付	平成 31 年 3 月 31 日
論文名	「ばね操作ガス遮断器の高速化とその構成要素の 衝撃強度評価に関する研究」
論文審査委員	主査 三村 耕司 副査 大多尾 義弘 副査 新谷 篤彦

論文要旨

送変電系統の変電所に設置される電力用遮断器は、通常状態では導体として電流を安定的に流す役割を有する。落雷などで送変電系統に異常電流が流れた場合、変電所内の変圧器などを保護するために、遮断器には速やかに異常電流を遮断する責務が課せられる。また、系統の異常がなくなった後では再び電気接点を速やかに投入することも遮断器に課せられる責務である。本研究では、電圧が 154 kV 以上の超高压変電所に幅広く適用されているガス遮断器を対象とする。ガス遮断器は、電流を遮断するための消弧媒体として空気より絶縁性、消弧性に優れた SF₆（六フッ化硫黄）ガスを密封容器内に封入して電気接点の開閉操作を行うものである。異常電流を速やかに遮断するため、数 k~100 kN の駆動力が必要であり、この駆動力を瞬時に発生させる操作機構として、空気操作式、油圧操作式、ばね操作式などが適用されてきた。この中で、ばね操作式は圧縮空気用のコンプレッサや油圧ユニットなどの補器が不要であるため、空気操作式や油圧操作式と比べるとメンテナンス性が良く、300 kV 以下のガス遮断器への適用が広がっている。

ガス遮断器の遮断時間は、JEC2300-2010(Japan Electro Technical Committee)において、定格電圧が 240 kV クラスの遮断器では、定格遮断電流が 31.5 kA 以上で遮断時間 2 サイクル（周波数 60 Hz の場合 33 ms）と規定されている。遮断時間 3 サイクル用の遮断器では開極後の時間幅を 1 サイクルとしており、遮断指令から開極までの時間が 2 サイクルである。開極後の時間幅を変更せずに 2 サイクル遮断を実現するためには、開極時間を 1 サイクルにしなければならない。3 サイクル用遮断器では、構造上単純な圧縮コイルばね操作方式での運用実績が既に多数存在する。ただし、駆動源に圧縮コイルばねを適用する場合、高出力化に伴い、ばね自身を駆動するエネルギーが増加して、遮断部を駆動するエネルギー効率が低下する可能性があった。これに対しては、柱状のバーのねじり弾性変形を利用したトーションバーを折り曲げて長さを短縮した上で操作エネルギーを増大させたガス遮断器が報告されている。トーションバーを適用することで遮断器の高速化を可能としているが、遮断ばね力を保持し高速に解放する機構については言及されていない。操作エネルギーの増大無しに、3 サイクル用遮断器に対して半分の時間で開極するためには、遮断ばね力を高速に解放する機構の開発が必要となる。

そこで本研究では、従来はトーションバーばね操作方式のガス遮断器でないと実現出来なかった 2 サイクル遮断を、3 サイクル遮断向けで多用されているコイルばね操作方式で実現可能とする高速化技術を開発することを目的とした。そのために、遮断器に開閉指令が入力されてから動作完了するまでの遮断器全体の動的挙動を模擬できる動作解析手法を構築した。その解析手法を活用して、遮断指令入力から接点が開極するまでの時間を 1 サイクルとする新機構を提案し、試作器に搭載して高速化を検証した。また、遮断部と操作機構とを接続し、遮断器内の絶縁を保つために用いられるガラス繊維強化プラスチック(GFRP)製のリンクを小形軽量化して高速化を図るために、長柱状試験片による座屈実験を行って、動的座屈挙動が静的座屈と異なることを実験的に検証した。

さらにまた、リンクやレバーなどの機構部品の小形軽量化による高速化を図るため、SS400（一般構造用圧延鋼材）を対象として、疲労試験中に生じるひずみ進展量を非接触で連続的に計測する手法を提案すると共に、通常疲労と衝撃疲労での試験片の破壊形態の遷移を検証した。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、本研究の工業上の背景となる、ばね操作ガス遮断器およびばね操作機構の概要について述べ、遮断器の高速化に関する課題を挙げて本研究の目的と構成を示した。

第2章では、ソレノイドの電磁場解析、FEM モーダル解析、パッファシリンダのガス圧力解析と機構解析を組み合わせ、開閉指令が入力されてから動作完了するまでのガス遮断器全体の挙動を把握可能な動作モデル化について示した。ばね操作機構を含む遮断器全体の機構解析モデルをベースとして、パッファシリンダの圧力の解析と連成させ、ソレノイドの動磁場解析と連携させた統合解析モデルを構築した。ガス遮断器の動作特性、開路操作時のレバーの接触力解放特性の解析値と実測値を比較し、構築した動作モデルの妥当性を検証した。また、ばね操作機構と遮断部とはガタを有するリンク系で接続されており、操作機構に対して遮断部の起動が遅れること、動作中盤で遮断部が先行すること、動作終盤では遮断部の制動が遅れることなどガス遮断器特有の動作特性を明らかにした。

第3章では、利用実績が十分にある従来の3サイクル遮断用ばね操作ガス遮断器を基に、従来とほぼ同一の部品構成とした上で機構の最適化を図ることで2サイクル遮断を可能とする高速化技術を開発した。まず、ガス遮断器に遮断指令が入力してから開極するまでを3つの時間帯に区分して、現状の動作時間を分析し、各時間帯における短縮目標を策定した。遮断指令入力から引外しトリガの係合が解除されるまでの時間 t_1 は、2サイクル遮断を実現するために74%短縮する必要があった。このため、引外しトリガのレバー比増加によるソレノイドプランジャのストローク短縮化を図り、動磁場解析を活用してソレノイドの諸元を決定した。また、レバーの軽量化、係合長の短縮、レバー回転支持部の摺動抵抗の低減を検討し、第2章で構築した動作解析を活用して、引外し制御機構の動作時間 t_2 が32%短縮可能なことを明らかにした。さらに、リンク機構の気中レバーに不等振りを適用することで遮断動作初期の遮断部駆動力を増加させ、遮断ばねが起動してから開極までの動作時間 t_3 を高速化した。これら、ばね操作機構の引外し制御機構の改良と、遮断部とばね操作器とを接続するリンク機構の改良を試作機に適用して遮断器の開閉試験を行った結果、2サイクル遮断の目標開極時間1サイクルを達成した。

第4章では、GFRP製の長柱状試験片を対象として、準静的および低速域から高速域までの動的座屈試験を行って、動的座屈荷重の負荷速度および試験片寸法への依存性について調べた。初めにGFRPの高速引張および圧縮試験を行って、負荷速度を変化させても動的座屈荷重に対して縦弾性係数の依存性が無いことを確認した。次に準静的座屈試験を行って、GFRP製長柱の準静的座屈荷重がEulerないしRankineの式から算出した荷重値にほぼ一致することを確認した。次に0.001~4.5 m/sまでの速度範囲での動的座屈実験を行って、座屈荷重の静動比が負荷速度および細長比への依存性が強いこと、およびアルミニウム製長柱で提案した広範囲の負荷速度に対する静動比の実験式がガス遮断器用GFRPにも適用可能なことを明らかにした。

第5章では長柱の両端回転ないしは一端固定他端回転の末端条件においても、準静的な負荷速度から動的負荷速度への遷移領域では、座屈荷重に及ぼす末端係数が見かけ上変化する、より具体的に言えば、両端固定条件に近づく可能性について実験的に検証した。アルミニウム合金製A7075の長柱に対して準静的から動的負荷速度域における座屈実験を両端固定、一端固定他端回転、両端回転の各末端条件下で実施し、弾性座屈荷重の負荷速度、試験体長さおよび末端条件の依存性を検討した結果、静的な座屈荷重を上回る動的効果が顕在しなくなる速度と見なされる下限界速度が存在し、その速度は0.001~0.01 m/sの範囲内にあり、細長比が小さいほど大きくなることを示した。また、両端固定条件での座屈荷重を基準とした座屈荷重増大係数を負荷速度、試験片細長比、末端の拘束条件の関数とした近似式を提案した。さらに、準静的から動的な速度域において、試験体末端条件を考慮した座屈荷重の静動比を表す実験式を提案し、実験結果と概ね一致することを示した。

第6章では、ガス遮断器を初めとして、産業機械のリンク、レバーなどの機構部品に多く用いられている鉄鋼材の一つであるSS400について、平滑材およびUノッチR2.0、VノッチR0.8の切欠材を対象として、破断までの繰り返し数を5万回程度までとした衝撃および通常の疲労強度特性を把握することを目的とした。従来技術では衝撃疲労試験中の所定の回数で試験片の直径を測定し、繰り返し数と試験片に生じるひずみとの関係を把握していたが、本研究においては試験片のひずみ進展量を2次元寸法測定器により連続的に算出可能とする測定体系を提案した。そして、衝撃疲労試験と通常疲労試験でのひずみ進展量を求めるとともにSEMによる破断面観察を行って、衝撃疲労と通常疲労での平滑材および切欠材における破壊形態の遷移を検証した。この結果、平滑材に関しては、衝撃疲労の破断繰り返し数10,000回前後で、破壊形態が断面収縮型からき裂進展型に遷移することを明らかにした。また、SEMによる破断面観察の結果、断面収縮型破壊の試験片では延性破壊の特徴であるディンプルが見られ、き

裂進展型の試験片ではストライエーションが見られて、前記の疲労破壊形態の遷移を裏付けることが出来た。また、切欠材の衝撃疲労強度が破断繰返し数 8,000 回以上で平滑材よりも低下することを明らかにした。2 種類の切欠材同士の比較では、1) U ノッチ R2.0 切欠材の場合、衝撃疲労では通常疲労より小さなひずみ進展量で破断すること、2) V ノッチ R0.8 切欠材の方が U ノッチ R2.0 切欠材より少ないひずみ進展量で破断するが、破断繰返し数に対するひずみ進展量の傾きが似ていることを示した。また、SS400 平滑材および切欠材の衝撃疲労強度特性を通常疲労の Manson-coffin 則に倣って、ひずみ進展量 $\Delta \varepsilon_p$ と破断繰返し数 N_f との関係を表す式で整理できることを示した。

第 7 章では、本論文で得られた結論の総括を行った。

審査結果の要旨

本論文は、電力施設で使用される、ばね操作ガス遮断器の動作の高速化に必要な新規技術の設計と開発、それに伴う構成要素の動的強度の評価を取り扱ったもので、以下の成果が得られている。

- (1) ソレノイドの電磁場解析、FEM モーダル解析、パuffァシリンドラのガス圧力解析と機構解析を組み合わせて、開閉指令が入力されてから動作完了するまでのガス遮断器全体の挙動を把握可能な動作モデルを構築し、その解析手法を活用して、遮断指令入力から接点が開極するまでの時間を 1 サイクルとする新機構を提案し、試作器に搭載して高速化を実証している。
- (2) GFRP 製のリンクを模した長柱状試験片を対象として、準静的および低速域から高速域までの動的座屈試験を行って、動的座屈荷重の負荷速度、試験片の断面形状、寸法への依存性を明らかにした。得られた結果から動的座屈荷重と静的座屈荷重の比「静動比」は負荷速度の上昇とともに急激に増大すること、これらの原因が横方向慣性力の存在による座屈モードの高次化に起因することを明らかにした。また、静動比は負荷速度を応力波の伝播速度で除した無次元化速度の関数とすることで材質の差異を考慮し得ること、また細長比を用いることで断面形状と長さの影響を考慮し得ることを示し、静動比を無次元化速度と細長比のべき乗則で与える定式化を示している。
- (3) 現実の使用環境ではリンクの支持条件は、固定、回転、自由など用途によって様々に異なる。このため、端末支持条件が動的座屈強度に与える影響を実験的に精査した。この結果、負荷速度がわずかに上昇するだけで、回転あるいは自由支持の場合の座屈荷重はオイラーの予測式から逸脱し、両端固定条件での座屈荷重に漸近することを明らかにした。これは座屈を支配する様式が高次モードへと移行するため、端末条件の差異が座屈荷重に与える影響が相対的に小さくなることに起因する。本論文では、このような遷移速度領域における支持条件の異なる長柱の座屈荷重を普遍的に記述する実験式を提案し、その予測値が実測値と良い一致を示すことを明らかにしている。
- (4) 遮断器の高速駆動システムを構成するカム／レバー等、形状変化部を持つ要素を模した切欠き材、平滑材の衝撃疲労特性を実験的に明らかにした。平滑材に関しては、衝撃疲労の破断繰返し数 10000 回前後で破壊形態が断面収縮型からき裂進展型に遷移すること、また、SEM による破断面観察の結果、断面収縮型破壊の試験片では延性破壊の特徴であるディンプルが、き裂進展型の試験片ではストライエーションが観察され、前記の疲労破壊形態の遷移を裏付けること、さらに、切欠材の衝撃疲労強度は、破断繰返し数 8000 回以上で平滑材よりも低下すること等を明らかにしている。

以上の研究成果は、既存のガス遮断器の動作の高速化に多大な知見を与えるとともに、その構成要素の衝撃負荷時の設計に多大な貢献を成す貴重な成果であり、学術的・産業的な発展に寄与するところが大きい。また、申請者が自立して研究活動を行うに十分な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。